



Esta obra está bajo una [Licencia  
Creative Commons Atribución-  
NoComercial-Compartirigual 2.5 Perú](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/).

Vea una copia de esta licencia en  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN – TARAPOTO**

**FACULTAD DE ECOLOGÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA**



**Evaluación del sistema de humedal de flujo subsuperficial, para mejorar la  
calidad del agua de la quebrada Hierbabuena, tributario de la laguna de  
Pomacochas, Florida 2018**

**Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario**

**AUTORES:**

**Emer Islander Vásquez Pósito**

**Deyson Cubas Mundaca**

**ASESOR:**

**Ing. M. Sc. Santiago Alberto Casas Luna**

**Código N° 6051918**

**Moyobamba– Perú**

**2019**

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN – TARAPOTO

## FACULTAD DE ECOLOGÍA

### ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA



**Evaluación del sistema de humedal de flujo subsuperficial, para mejorar la  
calidad del agua de la quebrada hierbabuena, tributario de la laguna de  
Pomacochas, Florida 2018**

#### AUTORES:

Emer Islander Vásquez Pósito

Deyson Cubas Mundaca

Sustentada y aprobada el 28 de junio del 2019, ante el honorable jurado:

Ing. M.Sc. Julio César De La Rosa Ríos  
Presidente

Ing. Juan José Pinedo Canta  
Secretario

Ing. M.Sc. Marcos Aquiles Ayala Díaz  
Miembro

Ing. M.Sc. Santiago Alberto Casas Luna  
Asesor

## Declaratoria de Autenticidad

Yo, **Emer Islander Vásquez Pósito**, con DNI N° 48029332 y **Deyson Cubas Mundaca**, con DNI N° 73696570; egresados de la Facultad de Ecología, de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria, de la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, con la tesis titulada **“Evaluación del sistema de humedal de flujo subsuperficial para mejorar la calidad del agua de la quebrada hierbabuena tributario a la laguna Pomacochas, Florida 2018”**.

Declaro bajo juramento que:

1. La tesis presentada es de mi autoría.
2. He respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas. Por tanto, la tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente.
3. La tesis no ha sido auto plagiada; es decir, no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados y por tanto los resultados que se presenten en la tesis se constituirán en aportes a la realidad investigada.

De considerar que el trabajo cuenta con una falta grave, como el hecho de contar con datos fraudulentos, demostrar indicios y plagio (al no citar la información con sus autores), plagio (al presentar información de otros trabajos como propios), falsificación (al presentar la información e ideas de otras personas de forma falsa), entre otros, asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto.

Moyobamba, 28 de Junio del 2019.



.....  
**Emer Islander Vásquez Pósito**  
DNI N° 48029332



.....  
**Deyson Cubas Mundaca**  
DNI N° 73696570



Formato de autorización NO EXCLUSIVA para la publicación de trabajos de investigación, conducentes a optar grados académicos y títulos profesionales en el Repositorio Digital de Tesis.

**1. Datos del autor:**

Apellidos y nombres: VÁSQUEZ PUSITO EMER ESCANDER	
Código de alumno : 125246	Teléfono: 950665213
Correo electrónico : emer.unsm@gmail.com	DNI: 48029332

(En caso haya más autores, llenar un formulario por autor)

**2. Datos Académicos**

Facultad de: ECOLOGÍA
Escuela Profesional de: INGENIERÍA SANITARIA

**3. Tipo de trabajo de investigación**

Tesis	(X)	Trabajo de investigación	( )
Trabajo de suficiencia profesional	( )		

**4. Datos del Trabajo de investigación**

Título: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE HUELLA DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA MEJORAR LA CALIDAD DE AGUA DELA QUEBRADA HIERBABUENA, TRIBUTARIO A LA LAGUNA DE POMACOCAS, FLORIDA, 2018.
Año de publicación: 2019

**5. Tipo de Acceso al documento**

Acceso público *	(X)	Embargo	( )
Acceso restringido **	( )		

Si el autor elige el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, una licencia **No Exclusiva**, para publicar, conservar y sin modificar su contenido, pueda convertirla a cualquier formato de fichero, medio o soporte, siempre con fines de seguridad, preservación y difusión en el Repositorio de Tesis Digital. Respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo y en el Marco de la Ley 822.

En caso que el autor elija la segunda opción, es necesario y obligatorio que indique el sustento correspondiente:


**6. Originalidad del archivo digital.**

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto, como parte del proceso conducente a obtener el título profesional o grado académico, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el Jurado.

## 7. Otorgamiento de una licencia *CREATIVE COMMONS*

Para investigaciones que son de acceso abierto se les otorgó una licencia *Creative Commons*, con la finalidad de que cualquier usuario pueda acceder a la obra, bajo los términos que dicha licencia implica

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>

El autor, por medio de este documento, autoriza a la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Digital de Tesis, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento.

Según el inciso 12.2, del artículo 12° del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales - RENATI "Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precisando si son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Repositorio Digital RENATI, a través del Repositorio ALICIA".

  
.....  
Firma del Autor

## 8. Para ser llenado en la Oficina de Repositorio Digital de Ciencia y Tecnología de Acceso Abierto de la UNSM – T.

Fecha de recepción del documento:

28 / 08 / 2019



.....  
Firma del Responsable de Repositorio  
Digital de Ciencia y Tecnología de Acceso  
Abierto de la UNSM – T.

**\*Acceso abierto:** uso lícito que confiere un titular de derechos de propiedad intelectual a cualquier persona, para que pueda acceder de manera inmediata y gratuita a una obra, datos procesados o estadísticas de monitoreo, sin necesidad de registro, suscripción, ni pago, estando autorizada a leerla, descargarla, reproducirla, distribuirla, imprimirla, buscarla y enlazar textos completos (Reglamento de la Ley No 30035).

**\*\* Acceso restringido:** el documento no se visualizará en el Repositorio.



**Formato de autorización NO EXCLUSIVA para la publicación de trabajos de investigación, conducentes a optar grados académicos y títulos profesionales en el Repositorio Digital de Tesis.**

**1. Datos del autor:**

Apellidos y nombres:	Cubas Mondaca Deyson		
Código de alumno :	125207	Teléfono:	910612504
Correo electrónico :	cubas_02@hotmail.com	DNI:	73696570

(En caso haya más autores, llenar un formulario por autor)

**2. Datos Académicos**

Facultad de:	Ecología
Escuela Profesional de:	Ingeniería Sanitaria

**3. Tipo de trabajo de investigación**

Tesis	(X)	Trabajo de investigación	( )
Trabajo de suficiencia profesional	( )		

**4. Datos del Trabajo de investigación**

Título:	Evaluación del sistema de flujo subsuperficial para mejorar la calidad de agua de la quebrada hierbabuena, Tributario a la laguna Pomacochas, Florida, 2019.
Año de publicación:	2019

**5. Tipo de Acceso al documento**

Acceso público *	(X)	Embargo	( )
Acceso restringido **	( )		

Si el autor elige el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, una licencia **No Exclusiva**, para publicar, conservar y sin modificar su contenido, pueda convertirla a cualquier formato de fichero, medio o soporte, siempre con fines de seguridad, preservación y difusión en el Repositorio de Tesis Digital. Respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo y en el Marco de la Ley 822.

En caso que el autor elija la segunda opción, es necesario y obligatorio que indique el sustento correspondiente:


**6. Originalidad del archivo digital.**

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto, como parte del proceso conducente a obtener el título profesional o grado académico, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el Jurado.

#### 7. Otorgamiento de una licencia *CREATIVE COMMONS*

Para investigaciones que son de acceso abierto se les otorgó una licencia *Creative Commons*, con la finalidad de que cualquier usuario pueda acceder a la obra, bajo los términos que dicha licencia implica

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>

El autor, por medio de este documento, autoriza a la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Digital de Tesis, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento.

Según el inciso 12.2, del artículo 12° del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales - RENATI "Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precisando si son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Repositorio Digital RENATI, a través del Repositorio ALICIA".


  
Firma del Autor

#### 8. Para ser llenado en la Oficina de Repositorio Digital de Ciencia y Tecnología de Acceso Abierto de la UNSM – T.

Fecha de recepción del documento:

28 / 08 / 2019



  
Firma del Responsable de Repositorio  
Digital de Ciencia y Tecnología de Acceso  
Abierto de la UNSM – T.

\***Acceso abierto:** uso lícito que confiere un titular de derechos de propiedad intelectual a cualquier persona, para que pueda acceder de manera inmediata y gratuita a una obra, datos procesados o estadísticas de monitoreo, sin necesidad de registro, suscripción, ni pago, estando autorizada a leerla, descargarla, reproducirla, distribuirla, imprimirla, buscarla y enlazar textos completos (Reglamento de la Ley No 30035).

\*\* **Acceso restringido:** el documento no se visualizará en el Repositorio.



## **Dedicatoria**

A dos grandes mujeres, Doraliza Pósito Olivera y Manuela Mundaca Fernández, que hicieron hasta lo imposible para educarnos y poder alcanzar nuestras metas, dándonos su apoyo, brindándonos cariño y amor incondicional.

A Valentín Pósito Ayay y Clara Olivera Tapia, por siempre darnos sus consejos, por inculcar los valores con su ejemplo de humildad, perseverancia y sobre todo la amabilidad a todas las personas.

Especialmente a la memoria de mi padre Santos Cubas Araujo no está en el mundo terrenal, siempre me acompaña en los momentos más felices y de tristeza, gracias a él aprendí que no debo rendirme ante mis sueños, que a pesar de los obstáculos hay que luchar constantemente.

A Demetrio Terrones Oblitas, un buen amigo a quien se le estima mucho, agradeciendo su apoyo incondicional y sus consejos, por compartir momentos significativos y siempre estar dispuesto a escuchar y ayudar en cualquier momento de la vida, logrando así una meta.

**Emer Islander Vásquez Pósito**

**&**

**Deyson Cubas Mundaca**

## **Agradecimiento**

A Dios, por acompañarnos cada travesía que vamos en nuestras vidas.

A nuestros padres, hermanos y familiares que estuvieron en las buenas y en las malas de la vida, siempre puesto su confianza en nosotros para lograr nuestros objetivos.

A Mirela Velasco Flores por su apoyo incondicional en todo el desarrollo del proyecto.

Al Ing. Junior Zaldivar Díaz, por el apoyo pedagógico durante toda la vida universitaria.

Al Ing. M.Sc. Santiago Alberto Casas Luna, por el asesoramiento para el desarrollo de esta investigación.

A la municipalidad distrital de Florida-Pomacochas por su apoyo en el desarrollo del proyecto.

Al señor Iván Altamirano por permitir desarrollar nuestro proyecto en su terreno.

Al Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza, como docente guía y orientador en los análisis de los parámetros físicos – químicos de nuestro proyecto de investigación.

## Índice general

Dedicatoria.....	vi
Agradecimiento .....	vii
Índice general .....	viii
Índice de tablas .....	x
Índice de figuras .....	xi
Resumen .....	xiii
Abstract.....	xiv
Introducción.....	1
CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	3
1.1. Antecedentes de la investigación.....	3
1.2. Bases teóricas.....	6
1.3. Definición de términos.....	17
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS .....	20
2.1. Materiales.....	20
2.2. Métodos .....	21
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	25
3.1. Resultados.....	25
3.1.1. Diseño sistema de humedal de flujo subsuperficial .....	25
3.1.2. Análisis de los parámetros físico-químicos (nitratos, fosfatos oxígeno disuelto, pH y color).....	28
3.1.3. Determinación de parámetros físico-químicos mediante el porcentaje de capacidad de remoción.....	32
3.1.4. Comportamiento de los parámetros físico-químicos al manipular el porcentaje (0 %, 25%, 50%, 75% y 100%) de Jacinto de agua ( <i>Eichhornia                 crassipes</i> ). .....	35



3.1.5. Comparación de los análisis del agua filtrada con los estándares de calidad ambiental (ECA) para agua según el D.S N° 004-2017-MINAM, categoría 02, subcategoría C4.....	40
3.1.6. Resumen general de análisis totales (nitratos, fosfatos oxígeno disuelto, pH, color, durante las 10 semanas.....	43
3.1.7. Resultados del material atropogénico captados por el sistema .....	46
3.1.8. Evaluación basada en la normativa estándares de calidad ambiental para agua D.S N° 004-2017-MINAM, categoría 02, subcategoría C4.....	47
3.1.9. Evaluación basada en el análisis estadístico (t- Student para dos muestras independientes). .....	48
3.1.10. Resultado de lodos retenidos en el sistema y su tratamiento.....	50
3.2. Discusiones .....	51
CONCLUSIONES.....	52
RECOMENDACIONES .....	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55
ANEXOS.....	58

## Índice de tablas

	Pág.
Tabla 1 : Conductividad hidráulica del medio poroso del material.....	16
Tabla 2 : Fórmulas utilizadas para el dimensionamiento del sistema .....	21
Tabla 3 : Porcentaje de biomasa de Jacinto de agua para ver el comportamiento del sistema	23
Tabla 4 : Procedimientos para el análisis de muestras de agua .....	23
Tabla 5 : Procedimientos para el cálculo de diseño.....	25
Tabla 6 : Contrastación del efluente en los estándares de calidad ambiental (ECA) .....	47
Tabla 7 : Análisis de nitratos en 5 muestras .....	48
Tabla 8 : Prueba t para dos muestras independientes de nitratos .....	48
Tabla 9 : Análisis de fosfatos en 5 muestras .....	49
Tabla 10: Prueba t para dos muestras independientes de fosfatos .....	49
Tabla 11: Análisis de lodos obtenidos en el sistema de humedal.....	50

## Índice de figuras

	Pág.
Figura 1: Corte longitudinal de un humedal de flujo superficial, Fuente: (Centa), 2010). ...	8
Figura 2: Corte longitudinal de un humedal SFSS, Fuente: (Andrade, Camacho, Delgadillo, & Perez, 2010). ....	9
Figura 3: Procesos de depuración de los humedales artificiales, Fuente: (Lara, 1999). ....	11
Figura 4: Diagrama del metabolismo del nitrógeno, Fuente: (Cooper, 1996).....	12
Figura 5: Diseño estructural del sistema de humedal de flujo subsuperficial, vista general de planta, fuente, elaboración propia, 2018. ....	26
Figura 6: Sección transversal de sistema de humedal, fuente, elaboración propia, 2018. ..	27
Figura 7: Sección longitudinal de sistema de humedal de flujo subsuperficial del agua, fuente, elaboración propia, 2018.....	27
Figura 8: Análisis del nitrato en el afluente y efluente.....	28
Figura 9: Análisis del fosfatos en el afluente y efluente.....	29
Figura 10: Análisis del oxígeno disuelto en el afluente y efluente.....	29
Figura 11: Análisis de potencial del hidrógeno (pH) en el efluente y afluente. ....	30
Figura 12: Análisis del color en el afluente y efluente. ....	31
Figura 13: Eficiencia de remoción del Nitrato. ....	32
Figura 14: Eficiencia de remoción en fosfatos. ....	33
Figura 15: Eficiencia de oxigenación .....	33
Figura 16: Eficiencia del color. ....	34
Figura 17: Variación de concentración del nitrato. ....	35
Figura 18: Variación de concentración del fosfato.....	36
Figura 19: Variación en la concentración del oxígeno disuelto. ....	37
Figura 20: variación de resultados en el pH. ....	38
Figura 21: variación de resultados de color.....	39
Figura 22: Niveles de concentración de Nitratos comparados con los ECA.....	40



Figura 23: Niveles de concentración de fósforo total comparados con los ECA. ....	40
Figura 24: Niveles de concentración de oxígeno disuelto comparados con los ECA .....	41
Figura 25: Niveles de variación de potencial de hidrogeno (pH) comparados con los ECA.....	42
Figura 26: Niveles de variación de color comparados con los ECA. ....	42
Figura 27: Análisis de nitrato durante las diez (10) semanas de muestreo.....	43
Figura 28: Análisis de fósforo total durante las diez (10) semanas de muestreo. ....	43
Figura 29: Análisis de oxígeno disuelto durante las diez (10) semanas de muestreo. ....	44
Figura 30: Análisis de la variación de pH, durante las diez (10) semanas de muestreo.....	45
Figura 31: Análisis de variación de color durante las diez (10) semanas de muestreo. ....	46
Figura 32: Segregación del material de origen antropogénico captado por el sistema de humedal.....	46
Figura 33: Prueba de hipótesis de dos colas para nitratos .....	49
Figura 34: Prueba de hipótesis de dos colas para fosfatos. ....	50

## Resumen

El presente trabajo de investigación se realizó en la quebrada Hierbabuena, tributario a la laguna de Pomacochas – Florida, Bongará Amazonas, ubicado en las coordenadas UTM E: 1862923 y N: 9376774.1 aplicando un sistema de humedal de flujo subsuperficial para mejorar la calidad del agua de mencionada quebrada. El humedal de flujo subsuperficial tiene un diseño semihexagonal a escala, con un caudal constante de 1 L/s. con dos compartimentos (sedimentadores y cámaras filtrantes) de dimensiones de 0,85 m de altura, 5,40 m<sup>2</sup> de área superficial y 4,6 m<sup>3</sup> de volumen, a ello incluido 10 kg. De biomasa de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), representando el 50% del área superficial. El análisis de las aguas filtradas se realizó por un periodo de 2.5 meses (10 semanas) cada 7 días. Construido en el mes de febrero y puesta en marcha el 11 de marzo. Obteniéndose una máxima eficiencia del sistema en la semana 4, en nitratos de 0.2 mg/L. a 0.0 mg/L. con 100% de remoción; el potencial de hidrógeno varía de 7.88 a 7.69 unidades de pH; para el color de 29 unidades platino cobalto, a 3.0 unidades platino cobalto, con 89.7% de remoción de color; el oxígeno disuelto varía de 4.85 mg/L. a 5.48 mg/L.; en fosfatos de 10.6 mg/L. a 3.3 mg/L. con 68.9% de remoción significativa, no cumpliendo al ECA para agua. Finalmente se afirma que el sistema de humedal de flujo subsuperficial si mejora significativamente la calidad físico-químico del agua de la quebrada Hierbabuena tributario a la laguna de Pomacochas en un 80 % de los parámetros analizados, cumpliendo los ECAs para agua, del DS N° 004 – 2017-MINAM, categoría 2 y subcategoría C4.

Palabras claves: Humedal de flujo subsuperficial, remoción, ECA.

## Abstract

The following work of investigation was conducted in the Hierbabuena stream, tributary to the Pomacochas - Florida lagoon, Bongará Amazonas, located at UTM coordinates E: 1862923 and N: 9376774.1 applying a subsurface flow wetland system to improve water quality of mentioned broken. The subsurface flow wetland has a semihexagonal design at scale, with a constant flow rate of 1 L / s. with two compartments (sedimentation and filtering chambers) of dimensions of 0.85 m in height, 5.40 m<sup>2</sup> in surface area and 4.6 m<sup>3</sup> in volume, including 10 kg. Of biomass of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), representing 50% of the surface area. The analysis of the filtered waters was carried out for a period of 2.5 months (10 weeks) every 7 days. Built in the month of February and launched on March 11. Obtaining a maximum efficiency of the system in week 4, in nitrates of 0.2 mg / L. at 0.0 mg / L. with 100% removal; the hydrogen potential varies from 7.88 to 7.69 pH units; for the color of 29 cobalt platinum units, at 3.0 cobalt platinum units, with 89.7% color removal; dissolved oxygen varies from 4.85 mg / L. at 5.48 mg / L; in phosphates of 10.6 mg / L. to 3.3 mg / L. with 68.9% significant removal, not complying with the ECA for water. Finally, it is affirmed that the subsurface flow wetland system significantly improves the physico-chemical quality of the water from the Hierbabuena creek tributary to the Pomacochas lagoon in 80% of the analyzed parameters, complying with the ECA for water, of the DS N ° 004 - 2017- MINAM, category 2 and subcategory C4.

Keywords: Sub-surface flow wetland, removal efficiency, ECA.





## Introducción

Hoy en día los problemas más catastróficos que viene enfrentando el planeta en estos últimos años es la contaminación del agua, debido al crecimiento poblacional, la industrialización y globalización, acelerando así el proceso de desequilibrio fisicoquímico y biológico, alterando ecosistemas, cadenas tróficas, incluyendo la calidad de agua para consumo humano.

La laguna de Pomacochas, ubicada en el distrito de Florida, provincia de Bongará y departamento de Amazonas, tiene diversos factores de contaminación, debido a que los riachuelos tributarios que alimentan el volumen de agua atraviesan por la ciudad, terrenos agrícolas y ganaderos, ocasionando así que la mencionada laguna tenga problemas de contaminación.

Por lo tanto, ante esta problemática de alteración y contaminación a la laguna de Pomacochas, surge la pregunta:

¿Cuál es el efecto del sistema de humedal de flujo subsuperficial para mejorar la calidad del agua de la quebrada “Hierbabuena” tributario de la laguna de Pomacochas?

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el sistema de humedal de flujo subsuperficial para mejorar la calidad del agua de la “Quebrada Hierbabuena” tributario a la laguna de Pomacochas, Florida, 2018; teniendo como objetivos específicos diseñar el sistema de humedal de flujo subsuperficial a escala determinada, conformados por grava gruesa, grava mediana y Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*), analizar los contaminantes en los parámetros físico-químicos de calidad del agua a la entrada y a la salida del sistema y realizar la comparación de los análisis del agua filtrada con los estándares de calidad ambiental (ECA) para agua según el D.S N° 004-2017-MINAM, categoría 02, subcategoría C4.

Para la investigación se consideró como variable independiente al humedal de flujo superficial y la variable dependiente la calidad físico-químico del agua, como hipótesis de investigación se consideró que el sistema de humedales de flujo subsuperficial mejorará la calidad del agua en la quebrada Hierbabuena tributario a la laguna de Pomacochas. La importancia del presente estudio de investigación radica en concretar una alternativa de

solución frente a la alteración de los sistemas acuáticos, siendo el sistema de humedal de flujo subsuperficial un tratamiento de dar fácil mantenimiento, además, es económico y práctico.

Las limitaciones del presente estudio de investigación es la gran cantidad de sólidos que acarrea la quebrada, haciendo que los filtros de grava fina se saturen y eviten el paso del agua. Por lo que se estableció colocar más plantaciones de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) en la entrada del canal hacia el sistema con el propósito de disminuir los sólidos antes de su ingreso. Para el desarrollo de la investigación se dio en épocas de lluvias, haciendo que haya una variación en los resultados de las muestras, debido a que los contaminantes se diluían, disminuyendo su concentración.

El presente estudio de investigación está estructurado en tres capítulos; en el primer capítulo señala los antecedentes en las revisiones bibliográficas, para tener mejor panorama del desarrollo en la investigación, los conceptos y términos básicos para la mejor comprensión. En el segundo capítulo señala los materiales y métodos, indicando los equipos involucrados y procedimientos para el desarrollo del proyecto. En el tercer capítulo se detallan la interpretación y discusión de los resultados según cada objetivo de la investigación, tablas y figuras para su mejor entendimiento, además las conclusiones y recomendaciones necesarias del presente estudio.

# CAPÍTULO I

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1.1. Antecedentes de la investigación

(Kantawanichkul & Wannasri, 2013), Indican en su trabajo de investigación experimental “Tratamiento de aguas residuales por flujo subsuperficial horizontal y vertical en sistemas de humedales construidos en climas tropicales” realizado en Tailandia, usaron grava como sustrato y la especie *Cyperus alternifolius*. Los parámetros fisicoquímicos evaluados fueron la siguiente: El potencial de hidrógeno (pH), temperatura, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, nitratos, nitritos, amonio, sólidos suspendidos totales y fósforo total. La reducción de contaminantes de los humedales es mayor para los parámetros orgánicos, sólidos y nutrientes (fósforo y nitrógeno). En conclusión, la elaboración de los humedales artificiales con la especie *Cyperus alternifolius* lograron remover los contaminantes orgánicos, nutrientes nitrogenados y los sólidos suspendidos totales presente en las aguas residuales domésticas.

(Arivoli & Mohanraj, 2013), indican en su trabajo de investigación experimental “eficiencia de la *Typha angustifolia* construido en un humedal de flujo vertical para la reducción de contaminantes de las aguas residuales domésticas” realizado en la India. El análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos fueron la siguiente: La turbidez, pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, fosfatos y nitratos. Para la construcción del humedal artificial vertical se elaboraron dos camas, la primera contiene a la especie *Typha angustifolia* y la segunda no tiene vegetación, pero sirve como un control. Para el funcionamiento de los humedales se realizó 3 formas de retención hidráulica: 12, 24 y 36 horas. El porcentaje de remoción para el humedal se dio en un 70% de la mayoría de los parámetros.

(Bedoya, Ardila, & Reyes, 2014), indican en su trabajo de investigación experimental “evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquía, Colombia” que se construyó dos humedales de figura geométrica trapezoidal, cada humedal presenta gravas como medio de soporte, pero diferente vegetación las cuales son: *Typha latifolia* y *Cyperus papyrus*. Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados fueron las

siguientes: Los sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, fósforo y como adicionales los coliformes, zinc y níquel. El humedal con la especie *Typha latifolia* presenta mayor porcentaje de remoción que la otra especie con los siguientes valores: Demanda química de oxígeno 70,40%, demanda bioquímica de oxígeno 96,70% y sólidos suspendidos totales 81,40%.

(Bedoya, Ardila, & Reyes, 2014), indica en su trabajo de investigación aplicada y explicativa “tratamiento terciario del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales El Cortijo para uso agrícola con humedales construidos de flujo superficial” utilizando como especie vegetal *Scirpus coliformicus* “Totora” y *Typha angustifolia* “Tina o inea” se propuso mejorar el efluente de la planta a través de un humedal artificial (flujo superficial) a pequeña escala. El objetivo de la investigación fue analizar el potencial del humedal. La demanda bioquímica de oxígeno 92,49%, sólidos suspendidos totales 83,33%, coliformes fecales 99,99%, coliformes totales 99,98% y cromo total 76,52%. Las aguas tratadas cumplieron con la ley general de aguas N° 17752.

(Medina & López, 2013), indican en su trabajo de investigación “evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante humedales artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies *Cyperus papyrus* y *Phragmites australis*” realizado en Carapongo, Lima. Los resultados de los cálculos fueron los siguiente: Para la retención hidráulica fue de 2 días, se obtuvo teóricamente la concentración de demanda bioquímica del efluente en 5 mg/L a partir de 270 mg/L, la relación de ancho y largo con proporción de 2:1, las dimensiones de 60 cm de largo, 40 cm de ancho y 30 cm de alto. Los parámetros evaluados con sus respectivos porcentajes de remoción fueron lo siguiente: Para la demanda bioquímica de oxígeno 84%, coliformes fecales 89%, turbidez 77% y pH 3%.

(Medina & López, 2013), indican en su trabajo de investigación “Evaluación del comportamiento de un sistema de pantanos artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la granja de porcinos de la Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM”, se utilizaron dos especies vegetales tales como el *Phragmites australis* y *Cyperus alternifolius*. El objetivo de la investigación es evaluar la capacidad de remoción de contaminantes de las plantas mencionadas, los humedales con la especie vegetal *Cyperus alternifolius* logra mayor remoción en los parámetros de nitrógeno total y demanda química de oxígeno al 90% aproximadamente. Cabe decir que la especie vegetal *Phragmites*

*australis* es muy vulnerable a plagas y enfermedades que afecto su desarrollo y la remoción de contaminantes.

(Medina & López, 2013), indican en su trabajo de investigación “determinación de la eficiencia del humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en el barranco del sector Cruce de Uchuglla de la ciudad de Moyobamba 2013” construyó un humedal artificial utilizando la especie *Arundo donax* (Caña Brava) para determinar los parámetros físico-químicos y biológicos de las aguas residuales (coliformes termotolerantes, DBO<sub>5</sub>, DQO, pH, sólidos en suspensión, temperatura y turbiedad) pre y post. Para luego ser evaluación la eficiencia y comparar con los Límites Máximos Permisibles. Los análisis obtenidos para las aguas residuales domésticas, provenientes del sector cruce Uchuglla, los afluentes tienen una temperatura que oscila entre 22 y 23°C, la turbiedad del agua residual domestica varía entre 65 y 88 UNT, dependiendo de la cantidad de descarga de aguas residuales domésticas, la DBO varía entre 218 y 248 mg/L, en cuanto a los coliformes fecales los valores están entre 5745 y 5617 UFC/100ml y para los sólidos totales en suspensión los valores oscilan entre 185 y 215 mg/L. los efluentes que salen del humedal artificial tienen una temperatura que oscila 22 23°C, la turbiedad del agua residual domestica tratada varía entre 4.5 y 15 NTU, la DBO varía entre 161 y 97mg/L, en cuanto a los coliformes fecales los valores están entre 15 y 3541 UFC/100ml y para los sólidos totales en suspensión los valores oscilan entre 23 y 45 mg/L. se tuvo un muestreo mensual logrando que hasta el tercer mes cumpliera con los Límites Máximos Permisibles.

(Salvador Juárez Chota, 2018), indica en su trabajo de investigación que lo realizó en el matadero municipal de la ciudad de Moyobamba, aplicando humedal artificial de lecho fluidizado ascendente con macrofitas flotantes para el tratamiento de aguas residuales. Para el humedal artificial consideró un diseño característico de forma cilíndrica, basándose en un caudal de 100 L/día, con dimensiones de 1,15 m de altura, 0,86 m<sup>2</sup> de área superficial y 0,97 m<sup>3</sup> de volumen. La caracterización del agua residual que realizó por un periodo de 4 meses, obteniéndose una máxima eficiencia de tratamiento a los 63 días de funcionamiento, teniendo resultados por debajo de los límites establecidos a los parámetros DBO<sub>5</sub> de 12,5 mgO<sub>2</sub>/L, DQO de 96,5 mgO<sub>2</sub>/L, Sólidos totales disueltos de 725,0 ppm y Nitratos de 1,0 ppm, incremento de los parámetros Oxígeno Disuelto de 0,1 a 4,0 ppm, temperatura de 27,9 °C a 28,1 °C, Fosfatos de 0,6 a 13,0 ppm y el Potencial de hidrógeno de 7,3 a 7,4 unidades de pH; alcanzando una eficiencia de remoción del 98,7% en DBO<sub>5</sub>, 97,6% en DQO, 58,6%



en Sólidos totales disueltos y 23,1% en Nitratos; siendo el tiempo de retención hidráulica el factor externo más influyente del proceso de tratamiento. Finalmente afirma que la evaluación del humedal artificial si contribuye significativamente en la remoción de aguas residuales demostrando su veracidad con los valores máximos admisibles (VMA) para vertimiento de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.

## **1.2. Bases teóricas**

### **1.2.1. Definición de aguas residuales**

Las aguas residuales son las que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población. Después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, son recogidas por una red de alcantarillado que las conducirá hacia el humedal, (Mara, 2000).

### **1.2.2. Clasificación de las aguas residuales**

De acuerdo con las principales fuentes de contaminación se puede clasificar a las aguas residuales de la siguiente manera:

- **Domésticas**

Son aguas originadas en las viviendas o instalaciones comerciales o públicas. Aguas fecales y aguas de lavado y limpieza son los principales componentes de las aguas residuales de origen doméstico. Contienen gérmenes patógenos, materia orgánica, sólidos, detergentes, nitrógeno y fósforo principalmente.

- **Pluviales**

Son aguas caracterizadas por su escasa contaminación, provienen principalmente de drenajes o de escorrentía superficial, siendo de tal manera de aportación intermitente.

- **Aguas de origen industrial**

El agua de abastecimiento dentro de cada industria es utilizada fundamentalmente como: aguas de proceso, limpieza, refrigeración y calefacción, en gran proporción se transformará en agua residual, la contaminación generada dependerá del tipo de agua residual que generen los procesos citados anteriormente, caracterizando de esta manera a las aguas residuales industriales por su variedad y variabilidad.

### **Aguas de origen agrícola**

Los principales contaminantes que constituyen este tipo de aguas residuales se deben al arrastre de las aguas lluvias y aguas de riego de los productos usados en la agricultura como abonos, pesticidas, herbicidas, etc.

Las principales masas de agua receptoras de estos contaminantes son los ríos, embalses y acuíferos, perjudicando y modificando características físicas y químicas del agua de estos cursos receptores, debido a la falta de tratamiento de estos efluentes, los efectos de contaminación generados pueden afectar los usos posteriores de líquido vital del cauce contaminado.

- **Constituyentes del agua residual**

Básicamente los constituyentes en las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos, parámetros mediante los cuales se puede determinar el grado de contaminación del efluente y el tratamiento adecuado para la respectiva depuración, (Sebastian, 2014).

### **1.2.3. Tratamiento de las aguas residuales**

La gran importancia del agua para los seres vivos, el aumento de la producción de residuos líquidos y la descarga de dichos residuos en cuerpos de agua, genera la necesidad de diseñar e implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales que permitan eliminar contaminantes y microorganismos patógenos existentes en el agua, obteniendo de esta manera efluentes que cumplan con los parámetros físicos, químicos y biológicos de descarga o reutilización del agua, de acuerdo a la normativa ambiental vigente.

Con el transcurso de los años el hombre ha buscado diversas formas de recuperar las aguas contaminadas con el fin de satisfacer sus necesidades. Por ello, el tratamiento de aguas residuales es una alternativa que consiste en reducir sus contaminantes de forma sostenible para evitar los impactos negativos hacia el medio ambiente y salud humana, (Reynolds, 2002).

### **1.2.4. Humedales artificiales**

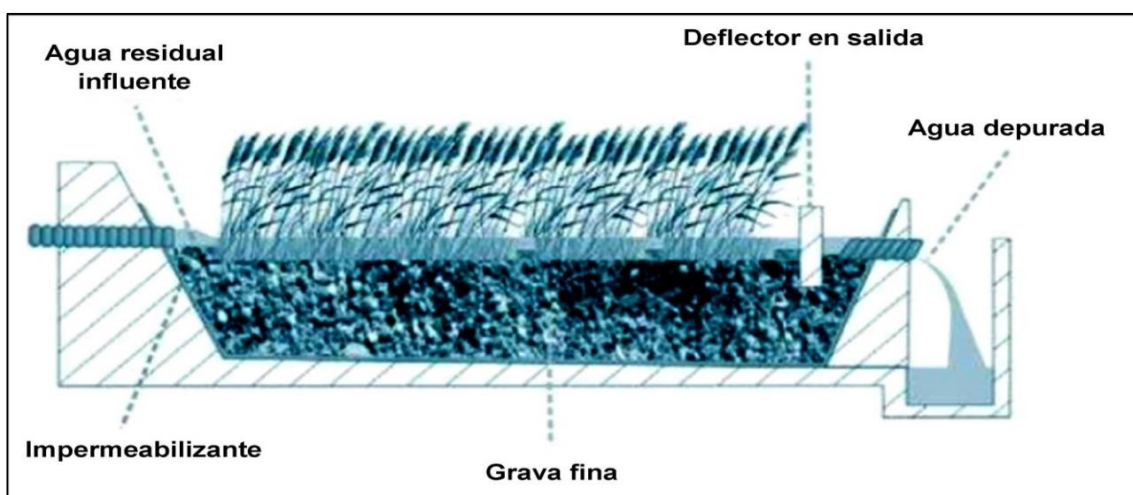
Los humedales artificiales son ecosistemas de fitodepuración contruidos por el hombre y usados como tratamiento secundario de aguas residuales domésticas grises. El humedal artificial es construido con especies vegetales que ayuda en la remoción de contaminantes

orgánicas mediante procesos físicos, químicos y biológicos que realiza la especie vegetal, (Mena & Sanz, 2008).

Los humedales requieren de poca energía y bajo mantenimiento para operar resultando un sistema de tratamiento alternativo, se le clasifica de dos tipos según el flujo: Superficial y subsuperficiales. Frecuentemente los humedales artificiales de tipo subsuperficial presentan sustrato, vegetación y microorganismos, mientras el de tipo superficial no tiene sustrato. Los microorganismos esencialmente son los responsables de transformar los contaminantes en sustancias menos tóxicas que sirve como nutriente para la vegetación. (Environmental Protection Agency – EPA, 1999)

#### 1.2.5. Humedal de flujo libre (SFS)

Aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera son definidos como humedales artificiales de flujo libre. Los humedales artificiales SFS consisten normalmente de una o más cuencas o canales de poca profundidad que tienen un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación al agua freática susceptible a contaminación, y una capa sumergida de suelo para las raíces de la vegetación macrófita emergente seleccionada. Cada sistema tiene estructuras adecuadas de entrada y descarga para asegurar una distribución uniforme del agua residual aplicada y su recolección, (EPA, 2000).

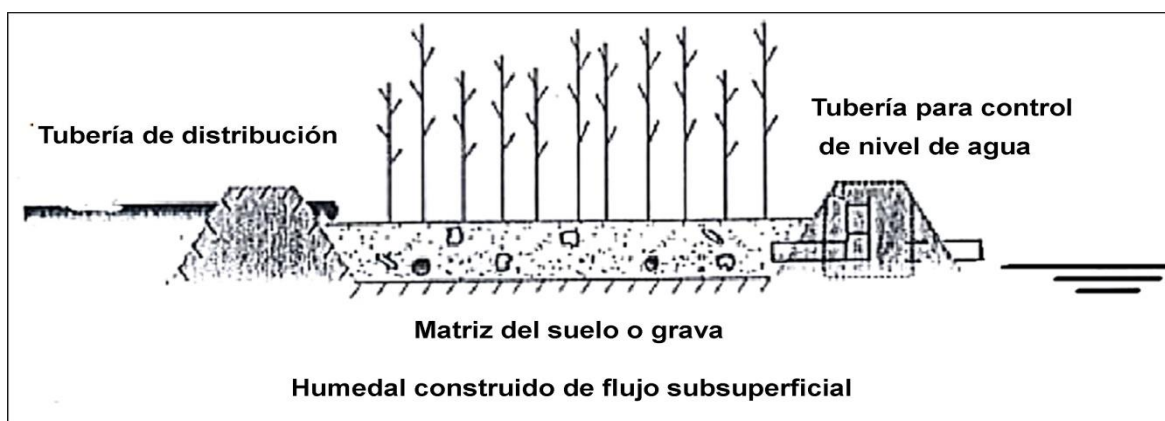


*Figura 1:* Corte longitudinal de un humedal de flujo superficial, Fuente: (Centa), 2010).

#### 1.2.6. Humedal artificial de flujo subsuperficial (SFSS)

Un humedal artificial de flujo subsuperficial está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido

típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado. En estos sistemas la circulación del agua se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m. La vegetación es plantada en el medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. Las estructuras de entrada y descarga se emplean para asegurar la distribución adecuada y la recolección uniforme del agua residual aplicada. El método más comúnmente utilizado en los sistemas de menor tamaño consiste en una tubería múltiple perforada, (EPA, 2000).



**Figura 2:** Corte longitudinal de un humedal SFSS, Fuente: (Andrade, Camacho, Delgadillo, & Perez, 2010).

### 1.2.7. Elementos del humedal artificial

Los humedales artificiales están constituidos básicamente por cuatro elementos: agua residual, sustrato, vegetación y microorganismos.

- **Agua**

La hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal construido porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario decisivo en su éxito o fracaso, por los siguientes motivos.

- Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento.
- Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, un sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (la pérdida combinada de agua por evaporación del suelo y transpiración de las plantas).
- La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de raíces y rizomas y bloqueando la exposición al viento y al sol, (Lara, 1999).

- **Sustrato (medio granular)**

En este tipo de tratamientos, el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico. Es fundamental que el medio tenga una permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con poco material fino. El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por razones:

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
  - La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- (Lara, 1999)

- **Vegetación**

La vegetación tiene la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación.

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
  - Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
  - Toman el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
  - Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
  - El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas oxigena otros espacios dentro del sustrato.
  - El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos,
- (Arias, 2004).

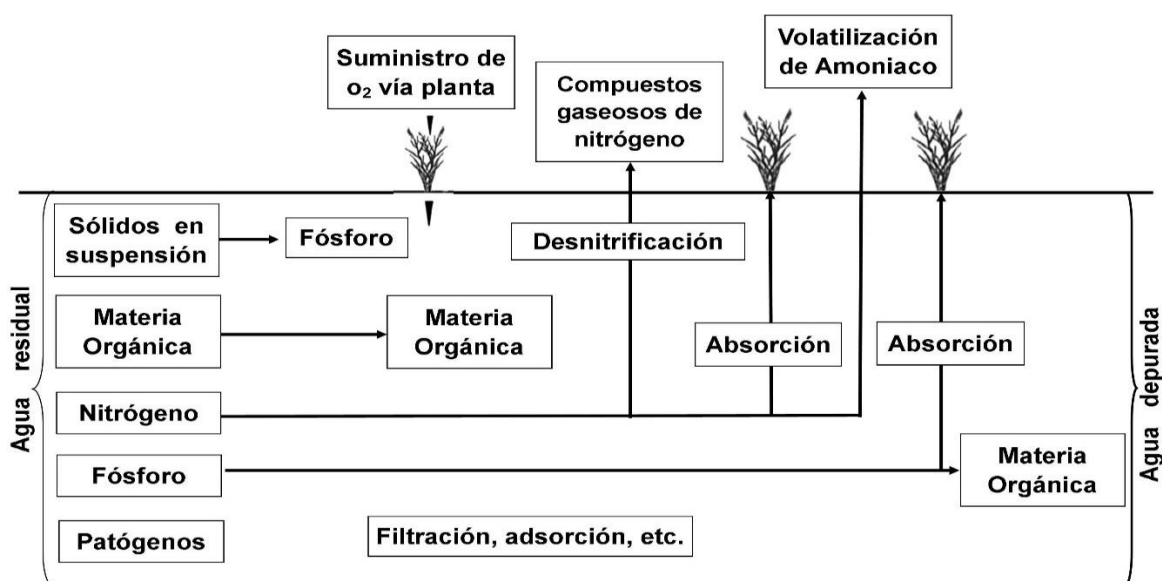
- **Microorganismos**

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominarán los microorganismos anaerobios.

Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza y la desinfección, (Arias, 2004).

### 1.2.8. Mecanismos de remoción de contaminantes

En este tipo de sistemas de depuración se desarrollan varios mecanismos de remoción de contaminantes del agua residual junto con un amplio rango de procesos biológicos, químicos y físicos, lo que convierte la influencia e interacción de cada componente como muy compleja.



**Figura 3:** Procesos de depuración de los humedales artificiales, Fuente: (Lara, 1999).

- **Remoción de DBO<sub>5</sub>**

La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos. La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están adheridos a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos. Todos los microorganismos involucrados en este proceso de tratamiento requieren una fuente de energía y carbono para la síntesis de nuevas células, como también otros nutrientes y elementos traza. de acuerdo con su fuente de nutrientes, están clasificados como heterótrofos o autótrofos. Los heterótrofos requieren material orgánico como fuente de carbono para la síntesis de nuevos microorganismos, en cambio, los autótrofos no utilizan materia orgánica sino dióxido de carbono como fuente de carbono, (Delgadillo, 2010).



- **Remoción de sólidos suspendidos**

Aunque la mayor parte de los sólidos suspendidos y sedimentables son removidos en tratamientos previos, los humedales filtran y sedimentan los remanentes, complementando esta remoción. En efecto, las raíces de las macrófitas y el sustrato reducen la velocidad del agua, favoreciendo ambos procesos. El tratamiento previo es muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal. (Kolb, 1998).

- **Remoción de materia orgánica**

La remoción de materia orgánica en los humedales artificiales se realiza por la adsorción de compuestos orgánicos en solución y por oxidación bacterial, ya que el suelo o el medio poroso contienen bacterias especializadas en degradar la materia orgánica, (Delgadillo, 2010).

La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos, (Kolb, 1998).

- **Remoción del nitrógeno**

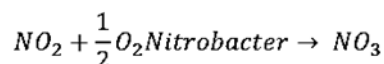
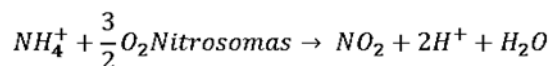
La mayor parte del nitrógeno al momento del ingreso del agua residual en el humedal se encuentra presente como amonio o en forma de un compuesto inestable, fácilmente transformable a amonio. La nitrificación y la desnitrificación, son los principales mecanismos de remoción de nitrógeno. Todo el proceso puede ser dividido en pasos, iniciando con la amonificación, seguido por la nitrificación y desnitrificación.



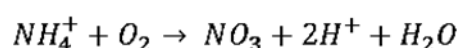
**Figura 4:** Diagrama del metabolismo del nitrógeno, Fuente: (Cooper, 1996).

El nitrógeno amoniacal es oxidado a nitritos por bacterias nitrificantes en las zonas anaerobias (Hammer, 1989).

Esta oxidación se desarrolla en dos etapas, en la primera las bacterias nitrosomas oxidan el nitrógeno amoniacal a nitritos, posteriormente las bacterias *Nitrobacter* oxidan los nitritos a nitratos de acuerdo con lo siguiente:

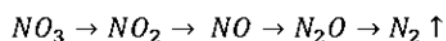


Resumiendo, las dos ecuaciones anteriores se obtienen:



Toda la reacción necesita un alto ingreso de oxígeno: alrededor de 4.5 kg por cada kg de amonio-nitrógeno ( $NH_4^+-N$ ) oxidado. Las bacterias son sensibles a un amplio rango de inhibidores; así, altas concentraciones de nitrógeno amoniacal son inhibidores. Es fundamental que existan concentraciones de oxígeno disuelto por encima de 1mg/L, si este nivel inferior el oxígeno se convierte en un limitante del proceso, produciendo que la nitrificación se realice más lentamente o que no se lleve a cabo (Centa, 2010).

La desnitrificación es el paso final en la remoción de nitrógeno. Ocurre bajo condiciones anaeróbicas. Un amplio rango de bacterias anaeróbicas facultativas realiza el proceso, siendo las más comunes *Pseudomonas sp*, *Achromobacter sp.* y *Aerobacter sp.* Esta reacción se desarrolla en dos etapas. En la primera se origina la reducción del nitrato en nitrito y seguidamente se reduce a formas gaseosas que se liberan del sistema hacia la atmosfera (óxido nítrico, óxido nitroso, nitrógeno gaseoso), (Centa, 2010).



La desnitrificación es también fuertemente dependiente de la temperatura y es necesario suficiente carbono como fuente de energía para que la bacteria realice la conversión.

### 1.2.9. Jacinto de agua (*Echhiornia crassipes*)

El Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), es una planta vascular acuática perenne con hojas verdes brillantes y flores que se despliegan de éstas. Los pecíolos de la planta son esponjosos

con pocos espacios de aire y contribuyen a la flotación del Jacinto. El rango de crecimiento promedio de cada planta en el agua residual es entre 0.5 y 1.2 m desde el tope de la flor hasta la punta de la raíz.

Las plantas por sí mismas, brindan muy poco tratamiento del agua residual. Su función es la de proveer componentes al ambiente acuático mejorando la capacidad del tratamiento del agua residual y la relación del ambiente. Puede duplicar su tamaño en 10 días y durante la estación normal de 8 meses de crecimiento una sola planta es capaz de producir 70000 plantas hijas, es resistente a los insectos y a las enfermedades, generalmente crece a temperaturas de agua mayores de 10 grados centígrados, (Rivas Mijares, 1978).

#### **1.2.10. Diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial**

- **Modelo general del diseño**

El diseño del humedal artificial depende de un modelo general que considera su rendimiento para la remoción de la materia orgánica a través de la cinética de primer orden de flujo a pistón. Para ello se aplica la siguiente fórmula matemática que necesita el caudal de entrada y salida del humedal expresados en m<sup>3</sup>/día, (Lara, 1999).

Ecuación básica para determinar el caudal:

$$Q = \frac{Q_e + Q_o}{2}$$

Dónde:

Q=Caudal medio del humedal.

Q<sub>e</sub>=Caudal de entrada o efluente

Q<sub>o</sub>=Caudal de salida o afluente

- **Constante de temperatura**

Para determinar la constante de temperatura del humedal se aplica la siguiente fórmula matemática:

$$K_T = K_{20^{\circ}\text{C}} \cdot 1^{(T - 20)}$$

K<sub>T</sub>=Constante cinética de 1° orden dependiendo de la temperatura

K<sub>20</sub>=Constante de velocidad de primer orden dependiendo de la temperatura

T=Temperatura

Tras obtener el caudal, se determina el área superficial mediante la siguiente fórmula matemática:

$$A_s = \frac{Q(\ln(\text{DBO}_{(5)})_e - \ln(\text{DBO}_{(5)})_s)}{K_T(y)(n)}$$

Dónde:

$A_s$ =Área superficial m<sup>2</sup>

$Q$ =Caudal L/seg

$\ln(\text{DBO}_{(5)})_e$ = Concentración del contaminante al ingreso o afluente en mg/L.

$\ln(\text{DBO}_{(5)})_s$ = concentración del contaminante de salida o efluente en mg/L.

$K_T$ =Constante de temperatura en el humedal.

$y$ =Profundidad del humedal en metros.

$n$ =Porosidad promedio de las capas filtrantes del humedal en %.

#### • **Diseño hidráulico**

El diseño hidráulico de los humedales artificiales es importante para la remoción de los contaminantes. Lo recomendable de la relación de largo – ancho, proporción de 4:1.

El régimen de flujo en un medio poroso necesario para diseñar humedales tipo SFSS es descrita por la ley de Darcy. Teniendo en cuenta las limitaciones que se generan ya que se asume un flujo laminar, en gravas muy gruesas puede darse un flujo turbulento o si el diseño usa un gradiente hidráulico alto. Adicionalmente la ley de Darcy asume que el flujo es constante, pero en la realidad se debe considerar las variaciones que se pueden generar por la precipitación, la evapotranspiración y la filtración, así como los posibles cortocircuitos que se pueden generar por la falta de homogeneidad en los poros del sistema o una mala construcción. (Lara, 1999).

Teniendo en cuenta estas consideraciones la ley de Darcy puede dar una aproximación razonable a las condiciones hidráulicas de un humedal de flujo subsuperficial.

#### LEY DE DARCY

$$Q = k_s * A_c * s$$

Dónde:

$Q$  : caudal promedio a través del humedal, m<sup>3</sup>/día.

$K_s$  : conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo,  $m^3/m^2/día$ .

$A_c$  : Área de la sección transversal perpendicular al flujo,  $m^2$ .

$S$  : Gradiente hidráulico o pendiente de la superficie del sistema  $m/m$ .

- **Tiempo de retención hidráulica**

La fórmula de la retención hidráulica para alcanzar los niveles de contaminación aceptables para descargas es la siguiente formulas.

$$TRH = \frac{(A_s)(y)(n)}{Q}$$

Dónde:

THR: Tiempo de retención hidráulica en días

$A_s$ : Área superficial  $m^2$

$y$ : Profundidad del humedal en  $m$ .

$n$ : Porosidad del medio o el medio poroso en %

La conductividad hidráulica del medio poroso cambia según los espacios vacíos de este, en el siguiente cuadro muestra los valores estimados para algunos medios que se usan para la construcción de humedales artificiales subsuperficiales:

**Tabla 1**

*Conductividad hidráulica del medio poroso del material.*

TIPO DE MATERIAL	TAMAÑO EFECTIVO $D_{10}$ (mm)	POROSIDAD $n$ (%)	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA $K_s \left( \frac{m^3/m^2}{d} \right)$
Arena fina	2	28-32	100-1000
Arena gruesa	8	30-35	500-5000
Grava fina	16	35-38	1000-10000
Grava media	32	36-40	10000-50000
Roca gruesa	128	38-45	50000- 250000

Fuente: (Delgadillo, 2010)

- **Relación largo-ancho(L/W)**

Luego para determinar la relación de largo-ancho del humedal, se propone que la relación no debe exceder de 3:1, se determina mediante la siguiente fórmula:

$$W = \frac{1}{y} \left[ \frac{(Q)(A_s)}{(m)(K_s)} \right]^{0,5}$$

Dónde:

W=Ancho del humedal en m.

$$Q = \frac{\text{Caudal}}{\text{Nº de unidades}}$$

m=Pendiente del lecho m/m

Ks=Conductividad hidráulica

$$A_s = \text{Area} \frac{\text{superficial}}{\text{Nº de unidades}}$$

Otros aspectos técnicos de la construcción de los humedales artificiales es tomar en cuenta la pendiente que sea menor del 3% aunque comúnmente es el 1%, también es importante la proporción de la relación largo – ancho entre 3:1 y 10:1, (Lara, 1999)

$$L = \frac{A_s}{W} = 3. WA_s = L. WW = \sqrt{\frac{A_s}{3}}$$

Dónde:

L=largo del humedal en m.

- **Porcentaje de capacidad de remoción**

Es el porcentaje obtenido por la diferencia entre la concentración antes y después del tratamiento.

$$\% \text{ Remoción} = \left( \frac{\text{Concentración entrada} - \text{Concentración salida}}{\text{Concentración entrada}} \right) \times 100$$

### 1.3. Definición de términos.

**Aguas Grises:** Tienen como característica principal su color que es propiamente dicha “Gris”. Son generadas por las actividades domésticas del hombre tales como el lavado de ropa, duchas y bañeras. No se considera a los inodoros, (Romero, 2004).

**Aguas Negras:** Tienen como característica principal de color negro originada por los inodoros, lavaplatos y fregaderos con alta presencia de contaminantes orgánicos y patógenos, (Baiona, 2011).



**Aguas Residuales:** Son una mezcla de todo efluente generado por diversas actividades antrópicas que son vertidas sin previo tratamiento ocasionando impactos negativos hacia el medio ambiente y la salud humana, (Rolim, 2000).

**Caudal:** Parámetro físico que determina el volumen de agua que pasa por una sección en un tiempo determinado. A su vez la relación que existe entre volumen y el tiempo son directamente proporcionales. La unidad de medida para este caso se expresa en m<sup>3</sup>/s. (Londoño & Marín, 2009).

**Color:** El color del agua proviene de materias orgánicas en suspensión o disueltas en ella, procedentes de la descomposición de vegetales, así como de diversos productos y metabolitos orgánicos que habitualmente se encuentran en ella.

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>),** consiste en la cantidad de oxígeno que demanda los microorganismos para oxidar o estabilizar la materia orgánica en condiciones aeróbicas. La DBO<sub>5</sub> es uno de los parámetros fisicoquímicos requeridos para la calidad de aguas residuales industriales o domésticas. También se define como el consumo de oxígeno (O<sub>2</sub>) mediante la degradación bioquímica de la materia orgánica. El tiempo de análisis es de 5 días y en un ambiente oscuro. Los resultados son expresados en valores numéricos de mg/L, (Ramalho, 1993).

**Humedales:** Los humedales son zonas donde el agua es el principal factor controlador del medio y la vida vegetal y animal asociada en él. Se clasifica en naturales o artificiales. Los humedales naturales son ecosistemas llamados riñones del mundo por su capacidad de depurar aguas contaminadas. Mientras los humedales artificiales son elaborados por el hombre. (Convención de Ramsar, 2013).

**Humedal artificial superficial de flujo libre:** Aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera son definidos como humedales artificiales de flujo libre.

**Humedal artificial de flujo subsuperficial:** Un humedal artificial de flujo subsuperficial está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual con filtraciones internas mediante un sustrato granular.

**Temperatura:** Es un parámetro físico esencial para evitar inconvenientes durante el funcionamiento del humedal artificial ya que genera malos olores y gases de invernadero. A su vez, al aumentar la temperatura también incrementa la remoción de demanda bioquímica de oxígeno y nitrógeno. (Londoño & Marín, 2009).

## **CAPÍTULO II**

### **MATERIAL Y MÉTODOS**

#### **2.1. Materiales**

##### **2.1.1. Materiales para el diseño e instalación del humedal**

- Alambre de púas para cerco perimétrico.
- Letrero del proyecto.
- 50 tablas de madera (3.00 x 0.25 x 0.03).
- 4 kilogramos de clavos para madera de 3”.
- 12 bultos (balde de 20 L.) de grava N°1 de 1.5 – 2.0 cm de diámetro.
- 9 bultos (balde de 20 L.) de grava N° 2 de 1.0 – 1.5 cm de diámetro.
- 6 bultos (balde de 20 L.) de arena gruesa.
- 20 ladrillos tipo pandereta.
- 6 metros de plástico hule azul-negro.
- Una pieza de tecnoport.
- 20 Kilogramos de biomasa de Jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*).

##### **2.1.2. Materiales para el análisis de los parámetros físico-químicos**

- 1 cooler de tecnopor.
- 2 recipientes de 0.5 litros.
- Termómetro, modelo HI98301 DiST®1.
- Peachimetro, modelo Eutech PHTEST20/01X366902/Oakton 35634-20).
- Semillas y nutrientes HACH para determinar DBO<sub>5</sub>, Buffer pillows de 0,5 mL para 300 mL.
- DR 900 Multiparámetros, modelo HACH IP67, certificación IECS-003.
- Medidor de OD, modelo HANNA HI98193.
- Reactivos de fosfato y nitratos, reactivo de solución estándar marca HACH.

##### **2.1.3. Materiales para la comparación de los resultados de los parámetros con el ECA para agua.**

- Decreto Supremo N° 004 – 2017- MINAM, categoría 2, subcategoría C4, ver el anexo F.

## 2.2. Métodos

### 2.2.1. Para el diseño del sistema de humedal a escala

- **Dimensionamiento del humedal**

Para el dimensionamiento del humedal artificial dependió de un modelo general que considera su rendimiento para la remoción de la materia orgánica. Teniendo en cuenta el análisis preliminar de la DBO<sub>5</sub> y fórmulas matemáticas según el marco teórico.

**Tabla 2**

*Fórmulas utilizadas para el dimensionamiento del sistema.*

Dimensión	Fórmula/Parámetro	Unidad
Caudal de ingreso	(Q <sub>e</sub> )	L/seg.
Caudal de salida	(Q <sub>s</sub> )	L/seg.
Constante de temperatura	$K_T = K_{20^{\circ}\text{C}} 1^{(T-20)}$	-----
Área superficial	$A_s = \frac{Q(\ln(\text{DBO}_{(5)})e - \ln(\text{DBO}_{(5)})s)}{K_T(y)(n)}$	m <sup>2</sup>
Área transversal para la relación largo- ancho	$Q = k_s * A_c * s$	m <sup>2</sup>
Tiempo de retención hidráulica	$TRH = \frac{(A_s)(y)(n)}{Q}$	Seg.

Nota: Recopilación de fórmulas para el diseño para el sistema de humedal de flujo subsuperficial, fuente: (Lara, 1999).

- **Diseño del humedal**

Una vez realizado el cálculo matemático se procedió a dibujar en el programa AutoCAD, con el propósito de establecer metrados mas reales, materiales y suministros para su instalación, además, tener una perspectiva en campo al momento de su construcción. Se realizó también una maqueta a escala, para la habilitación de tablas y listones.

- **Construcción del humedal**

Una vez tendiendo los materiales y suministros requeridos, se procede a llevar al lugar del desarrollo del proyecto siguiendo los siguientes pasos:

- Autorización para la instalación del sistema a propietario del terreno.
- Se realizó la limpieza del terreno, la delimitación e instalación de un cerco perimétrico para evitar el paso de personas y animales.

- Se procedió a la excavación de tierras según al dimensionamiento, considerando el canal de ingreso y de salida.
- Se instaló de tablas y listones según al diseño del proyecto, considerando el espacio para los sedimentadores y cámara de filtros de grava y arena.
- Se procedió a colocar los ladrillos en el área del filtros, seguidamente la colocación de grava N° 1 de 1.5 – 2.0 cm de diámetro con 15 cm. de altura, seguido grava N°2 de 1.0 - 1.5 cm de diámetro por 12 cm.; por último, la colocación de 8.0 cm. de arena gruesa.
- Se procedió al desvío de 1 L/seg. escala 1:100 del caudal general de la quebrada Hierbabuena de caudal promedio de 100 L/seg. con un respectivo caudalímetro para mayor referencia en épocas de avenidas y/o estiajes.
- Se colocó un flotador transversal a toda la quebrada para la retención de todo material flotante de origen antropogénico captados por un deflector instalado antes del ingreso al sistema de humedal.
- Seguidamente se colocó 5 kilogramos de biomasa de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) en cada compartimiento, representando el 50% de área superficial

- **Puesta en marcha del humedal**

- Una vez que se instaló el sistema de humedal, se dejó tres (3) semanas para la adaptación de las plantas y todo el sistema.
- El inicio de muestreo se dio el 11 de marzo del 2019.

## **2.2.2. El análisis de los parámetros físico-químicos**

- **Toma de muestras**

El muestreo fue desarrollado cada siete (7) días, durante dos meses y medio (2.5), haciendo un total de 10 muestras y/o semanas. Las tomas de muestras se realizaban todos los días lunes. Según se indica en el anexo D. Las muestras en las semanas 6, 7, 8, 9 y 10 se tendrán en cuenta la siguiente tabla

**Tabla 3**

*Porcentaje de biomasa de Jacinto de agua para ver el comportamiento del sistema.*

<b>Muestra N°</b>	<b>Descripción</b>	<b>Porcentaje (%)</b>	<b>Peso de biomasa (kg)</b>
6	“Jacinto de agua”	100	20
7	“Jacinto de agua”	00	00
8	“Jacinto de agua”	25	5
9	“Jacinto de agua”	50	10
10	“Jacinto de agua”	75	15

Nota: El porcentaje del Jacinto de agua se consideró toda el área superficial del sistema.

- **Método de recolección de muestra**

Para la recolección de las muestras se dio de manera manual, contando con los materiales de recolección y equipo de protección personal. Seguidamente ser traslado al laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Universidad Nacional de San Martín –T.

- **Análisis de muestras físico-químicos**

Para el análisis de muestras se siguió los siguientes procedimientos.

**Tabla 4**

*Procedimientos para el análisis de muestras de agua.*

<b>Análisis de muestras</b>	<b>Procedimientos</b>	<b>Instrumento</b>
Oxígeno disuelto (OD)	Se toma una muestra de 70 ml. mientras tanto seleccionamos al equipo en el parámetro oxígeno disuelto, luego colocamos la sonda en la muestra y apretamos el botón long, hasta ver la palabra hold.	HI 98193 Dissolver Oxígeno
pH	Se toma una muestra de 70 ml. en la cual colocamos el peachímetro hasta tocar el sensor y dejar estabilizar.	Eutech PHTEST20/01X 366902
Color (UPC)	Se toma una muestra de 10 ml. de agua destilada (testigo) y una de la muestra. Se coloca primero el testigo y de presiona C1, para luego colocar la muestra real y se presiona C2.	Color of water colorimeter HI727Cheker® HC
Temperatura	Colocar la sonda del termómetro in situ y leer.	Waterproof TDS tester, HI98301 DiST 1
Nitratos	Se toma una muestra de 10 ml. en las dos cubetas del multiparámetros, una	DR 900 multiparámetros,



---

	corresponde al testigo y otra para el análisis, a este último se coloca el reactivo NitraVer®5 Nitrate Reagent, agitándolo y dejando reposar por 5 min (este cambia a un color naranja). Pasado este tiempo, al testigo se coloca al instrumento estableciendo en cero (0.0) para luego colocar el de la muestra y apretar el botón leer.	modelo HACH IP67
Fosfatos	Se toma una muestra de 10 ml. en las dos cubetas del multiparámetros, una corresponde al testigo y otra para el análisis, a este último se coloca el reactivo Fosfato PhosVer®3, agitándolo y dejando reposar por 4 min (este cambia a un color azulejo). Pasado este tiempo, al testigo se coloca al instrumento estableciendo en cero (0.0) para luego colocar el de la muestra y apretar el botón leer.	DR 900 multiparámetros, modelo HACH IP67

---

*Nota:* Estos procedimientos se tomaron según las indicaciones del manual de cada instrumento del laboratorio, elaboración propia, 2019.

- **Análisis del material antropogénico captados por el sistema**

Para este parámetro, se tuvo en cuenta la segregación, considerando su peso y tipo de material. El recojo del material se realizó de manera quincenal (dos semanas) anotándose en un registro, tal como indica el anexo E, para posterior disposición final en botadero municipal de la localidad de Florida.

### 2.2.3. Comparación de los análisis con los estándares de calidad ambiental para agua

- **Tabla de ECAs para agua, categoría 2, subcategoría C4**

Para la comparación de resultados en los parámetros físico-químicos se tomó el ECA para agua, del DS N° 004 – 2017- MINAM, categoría 2 y subcategoría C4, ver el anexo F.

### 2.2.4. Análisis estadístico

- **Prueba t de Student**

Prueba t para dos muestras independientes.

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resultados

##### 3.1.1. Diseño sistema de humedal de flujo subsuperficial

- Dimensionamiento del sistema de humedal

**Tabla 5**

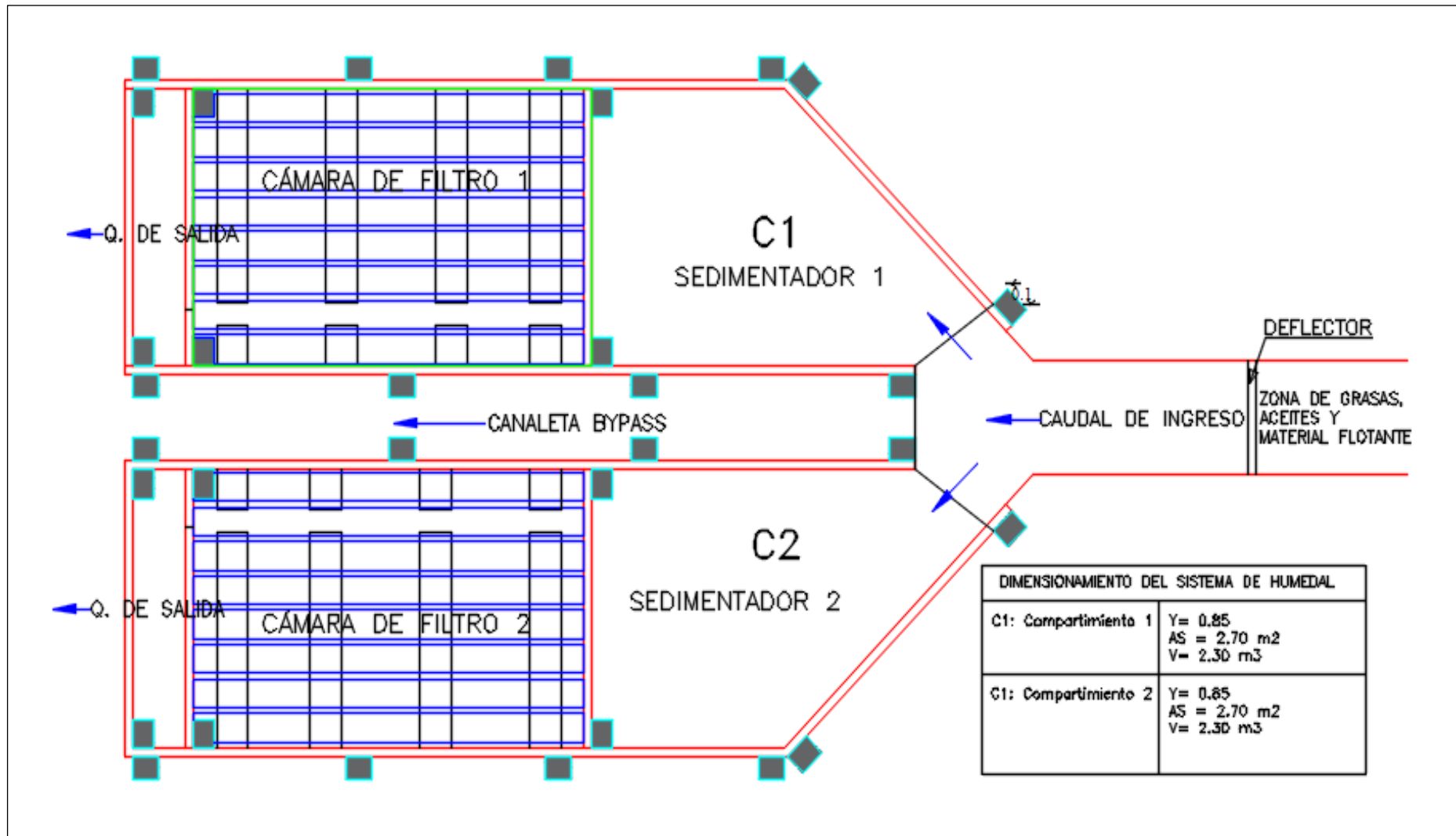
*Procedimientos para el cálculo de diseño.*

Dimensión	Fórmula/Parámetro	medida	unidad
Datos generales:			
Caudal medio	(Qm)	1.00	L/seg.
		86.4	m <sup>3</sup> /día
Temperatura	(T°C)	18.0	°C
DBO <sub>5</sub> afluente	DBO	30.0	mg/L
DBO <sub>5</sub> efluente	DBO	23.0	mg/L
Porosidad media	(n)	40	%
Conductividad	Ks	1000	( $\frac{m^3}{m^2 \cdot d}$ )
hidráulica			
Pendiente	S	0.05	m/m
Constante de temperatura	$K_T = K_{20^\circ C} 1^{(T-20)}$	0.14	-----
Área superficial	$A_s = \frac{Q(\ln(DBO_{(s)})e - \ln(DBO_{(s)})s)}{K_T(y)(n)}$	5.40	m <sup>2</sup>
Área transversal	$Q = k_s * A_c * s$ $A_c = (k_s * S) / Q$	1.70	m <sup>2</sup>
Tiempo de retención	$TRH = \frac{(A_s)(y)(n)}{Q}$	1.83	min.
hidráulica			
Profundidad	(y)	0.85	m.
Largo	(L)	2.70	m.
Ancho	(W)	2.00	m.
Volumen total del sistema	(V)	4.60	m <sup>3</sup>

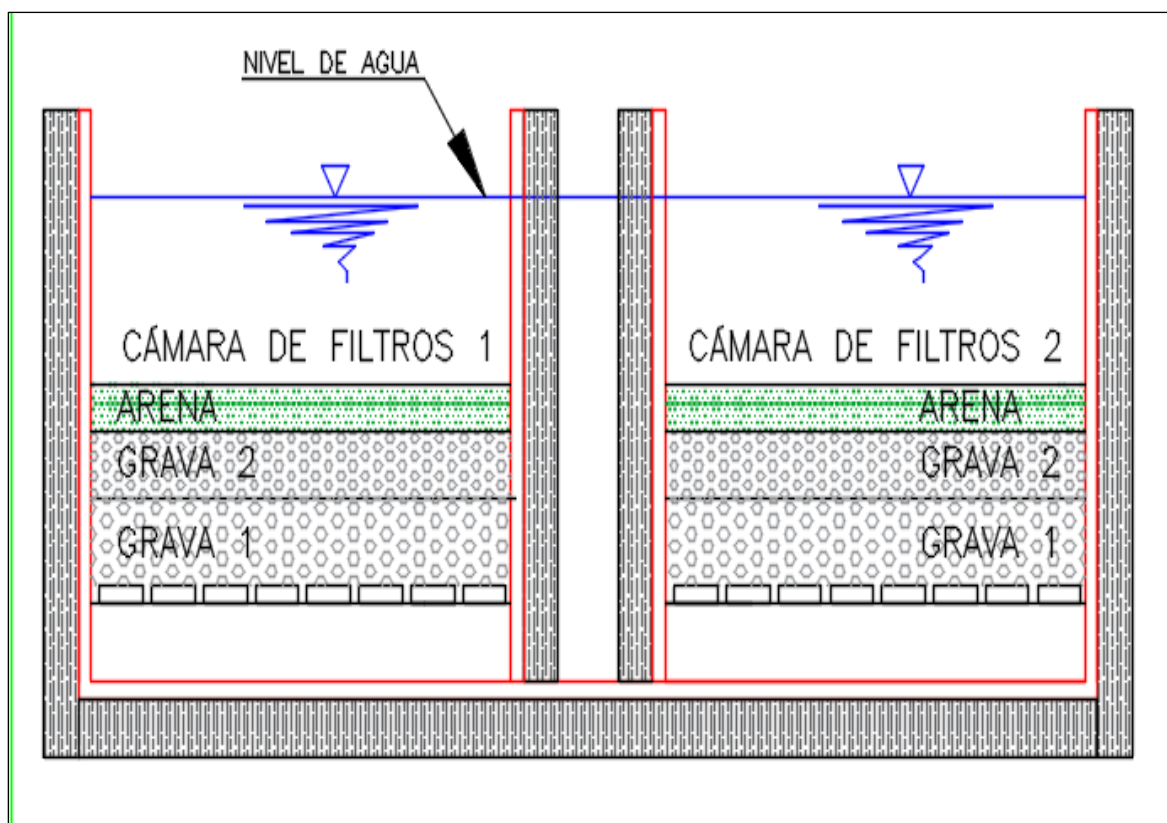
*Nota:* considerar en la constante de temperatura  $K_{20^\circ C} = 0.17$  y  $K_b = 1.085$  según (YANEZ COSSIO, 1983).

- Diseño estructural del sistema de humedal subsuperficial.

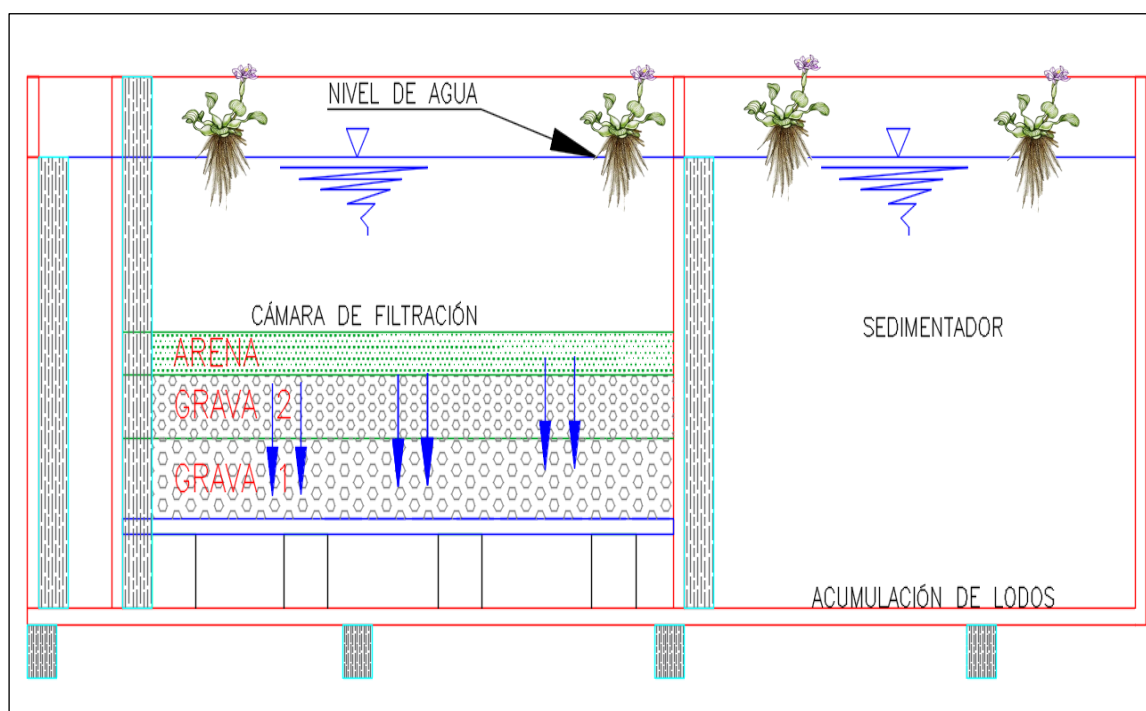
El diseño se considerando factores importantes como: el caudal constante, épocas de máximas avenidas y vida acuática. Por lo que se estableció dos compartimentos en las cuales van sedimentadores, cámara de filtros y un bypass intermedio que sirve como aliviadero, por lo que se dividió las dimensiones de cálculo en dos partes, teniendo la relación L/W de 3:1 tal como se indican en la siguientes figuras y el anexo B y C.



**Figura 5:** Diseño estructural del sistema de humedal de flujo subsuperficial, vista general de planta, fuente, elaboración propia, 2018.



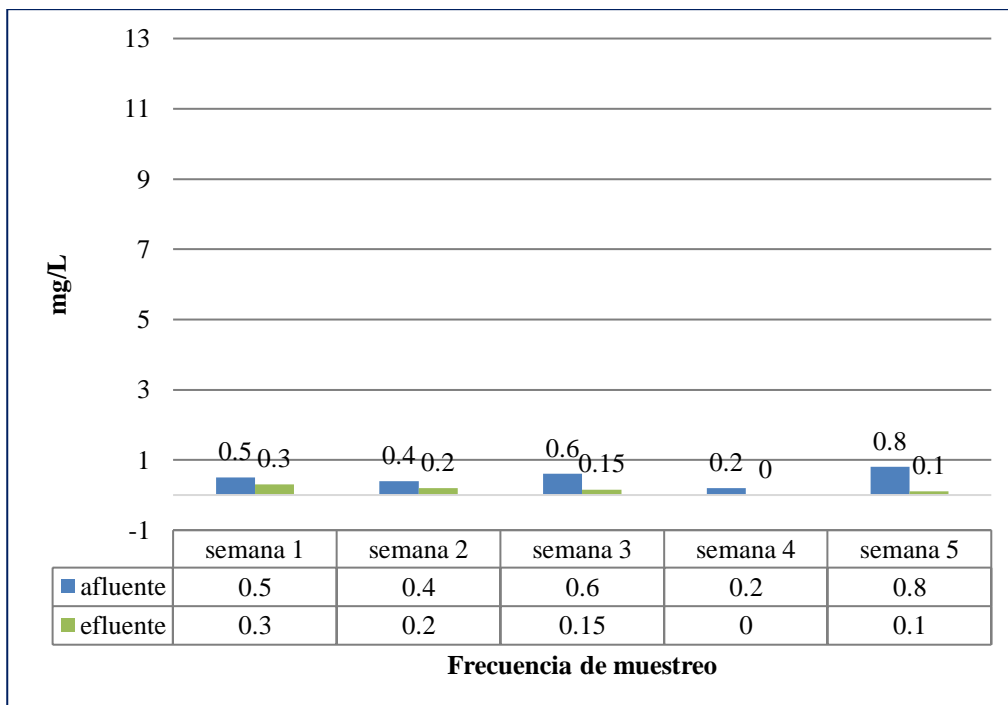
**Figura 6:** Sección transversal de sistema de humedal, fuente, elaboración propia, 2018.



**Figura 7:** Sección longitudinal de sistema de humedal de flujo subsuperficial del agua, fuente, elaboración propia, 2018.

### 3.1.2. Análisis de los parámetros físico-químicos (nitratos, fosfatos oxígeno disuelto, pH y color).

- **Análisis de nitratos.**



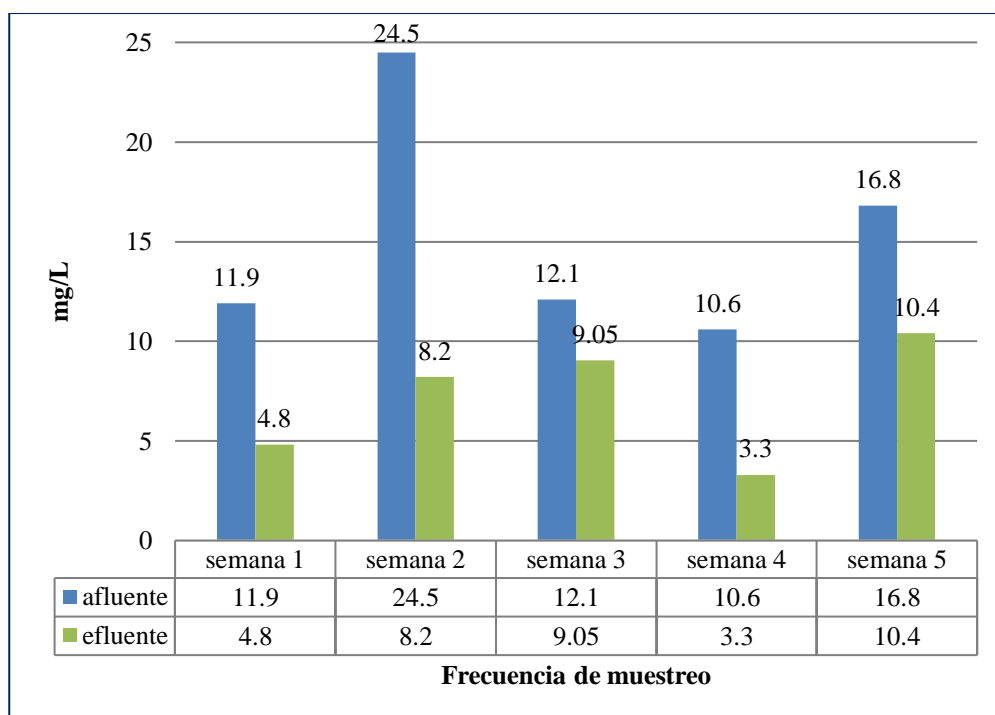
**Figura 8:** Análisis del nitrato en el afluente y efluente.

En la figura 8, se observa los rangos de la concentración registrados del nitrato durante el pre tratamiento (barras de color azul). Se puede observar que en la semana 1, semana 3 y semana 5, la mayor concentración que se registró es de 0.5 mg/L.; 0.6 mg/L. y 0.8 mg/L. respectivamente. Y la mínima concentración se registró en la semana 4 con un valor de 0.2 mg/L.

En la figura 8, se observa los rangos de la concentración registrados del nitrato post tratamiento (barras de color verde). Se observa que la máxima concentración se registró en la semana 1, con una concentración de 0.3 mg/L; y en la semana 4 se registró un mínimo valor de 0.0 mg/L.

- **Análisis de fosfatos.**

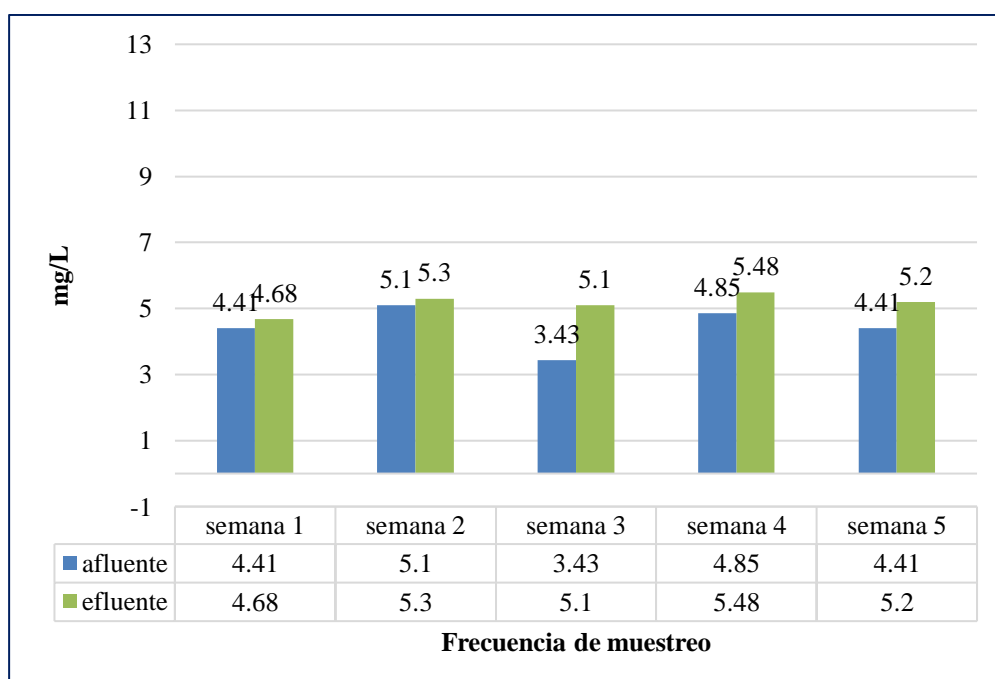
En la figura 9, se observa los rangos de la concentración registrados del fósforo total durante el pre tratamiento (Barras de color azul). Se puede observar que en la semana 2 la mayor concentración que se registró es de 24.5 mg/L; y la mínima concentración se registró en la semana 4 con un valor de 10.6 mg/L.



**Figura 9:** Análisis del fosfato en el afluente y efluente.

En la figura 9, se observa los rangos de la concentración registrados del fósforo total post tratamiento (Barras de color verde). Se observa que la máxima concentración se registró en la semana 5 con una concentración de 10.4 mg/l; y en la semana 4 se registró un mínimo valor de 3.3 mg/l.

- **Análisis del oxígeno disuelto.**

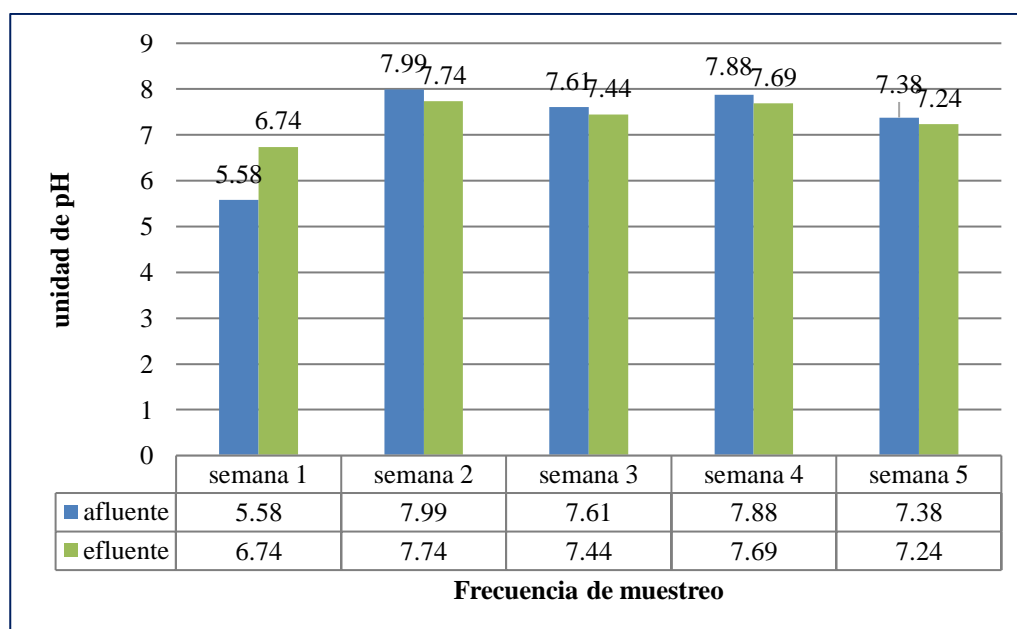


**Figura 10:** Análisis del oxígeno disuelto en el afluente y efluente.

En la figura 10, se observa los rangos de la concentración registrados del oxígeno disuelto total durante el pre tratamiento (barras de color azul). Se puede observar que en la semana 2 la mayor concentración que se registró es de 5.1 mg/L.; y la mínima concentración se registró en la semana 3 con un valor de 3.43mg/L.

En la figura 10, se observa los rangos de la concentración registrados del oxígeno disuelto total post tratamiento (barras de color verde). Se observa que la máxima concentración se registró en la semana 4 con una concentración de 5.48 mg/L.; y en la semana 1 se registró un mínimo valor de 4.68 mg/L.

- **Análisis potencial de hidrogeno (pH).**

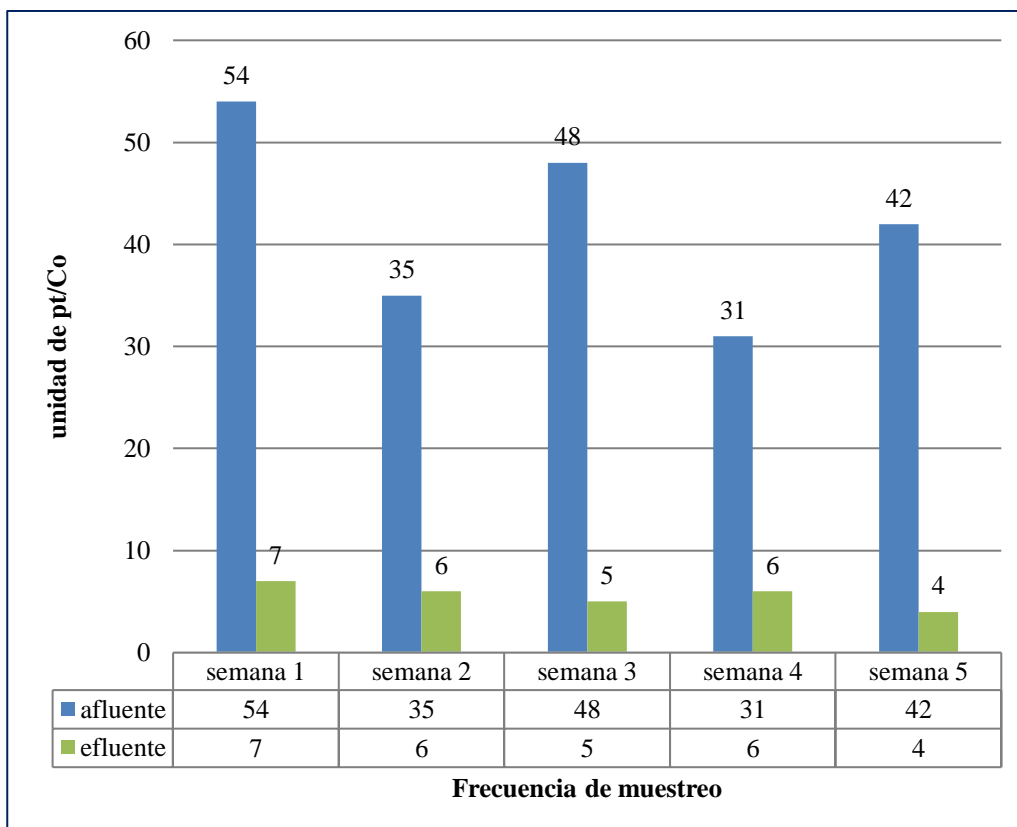


**Figura 11:** Análisis de potencial del hidrógeno (pH) en el efluente y afluente.

En la figura 11, se observa los rangos de la concentración registrados del pH durante el pre tratamiento (barras de color azul), se puede observar que la mayor concentración se registró en la semana 2 con una concentración de 7,99 unidades de pH; y la mínima concentración fue registrada en la semana 1 con un valor de 5,58 unidades de pH.

En la figura 11, se observa los rangos de la concentración registrados del potencial de hidrógeno durante el post tratamiento (barras de color verde), se observa que la máxima concentración se registró en la semana 2 con una concentración de 7.74 unidades de pH; y la mínima concentración fue registrada en la semana 1 con un valor de 6.74 unidades de pH.

- **Análisis de color PCU (unidades platino cobalto)**



**Figura 12:** Análisis del color en el afluente y efluente.

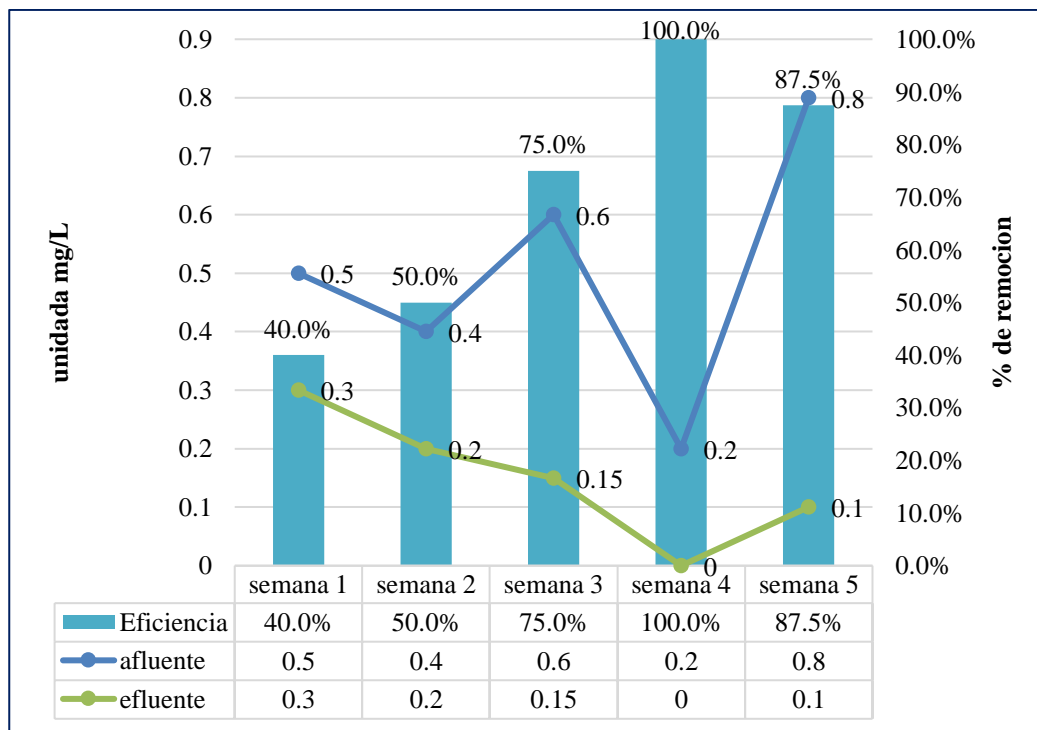
En la figura 12, se observa los rangos de la concentración registrados del color durante el pre tratamiento (barras de color azul). Se puede observar que la mayor concentración se registró en la semana 4 con una concentración de 58 unidades platino cobalto; y la mínima concentración fue registrada en la semana 4 con un valor de 35 unidades platino cobalto.

En la figura 12, se observa los rangos de la concentración registrados del color durante el post tratamiento (barras de color verde). Se observa que la máxima concentración se registró a la semana 1 con una concentración de 7 unidades platino cobalto; a la semana 5 se registró una mínima con un valor de 4 unidades platino cobalto.



### 3.1.3. Determinación de parámetros físico-químicos mediante el porcentaje de capacidad de remoción.

- **Eficiencia de remoción en nitratos.**

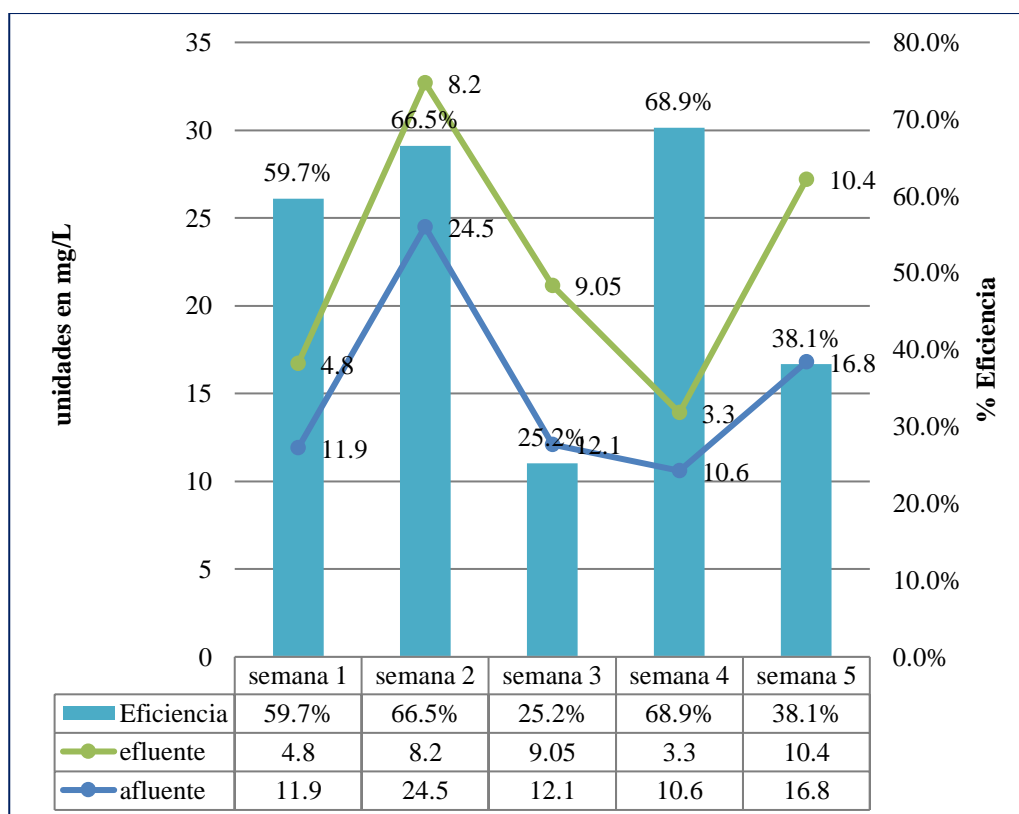


**Figura 13:** Eficiencia de remoción del Nitrato.

En la figura 13, se puede apreciar el porcentaje de remoción del nitrato. Se observa que la curva característica presenta es una curva creciente – decreciente, iniciando en la curva creciente con un porcentaje alto de remoción positiva de 40.0 % en la semana 1, 50 % en la semana 2, 75.0 % en la semana 3 y finalizando en la curva creciente positiva con un porcentaje de remoción de 100% en la semana 4 y finalmente terminando con una curva de porcentaje de remoción de 87.5 % en la semana 5.

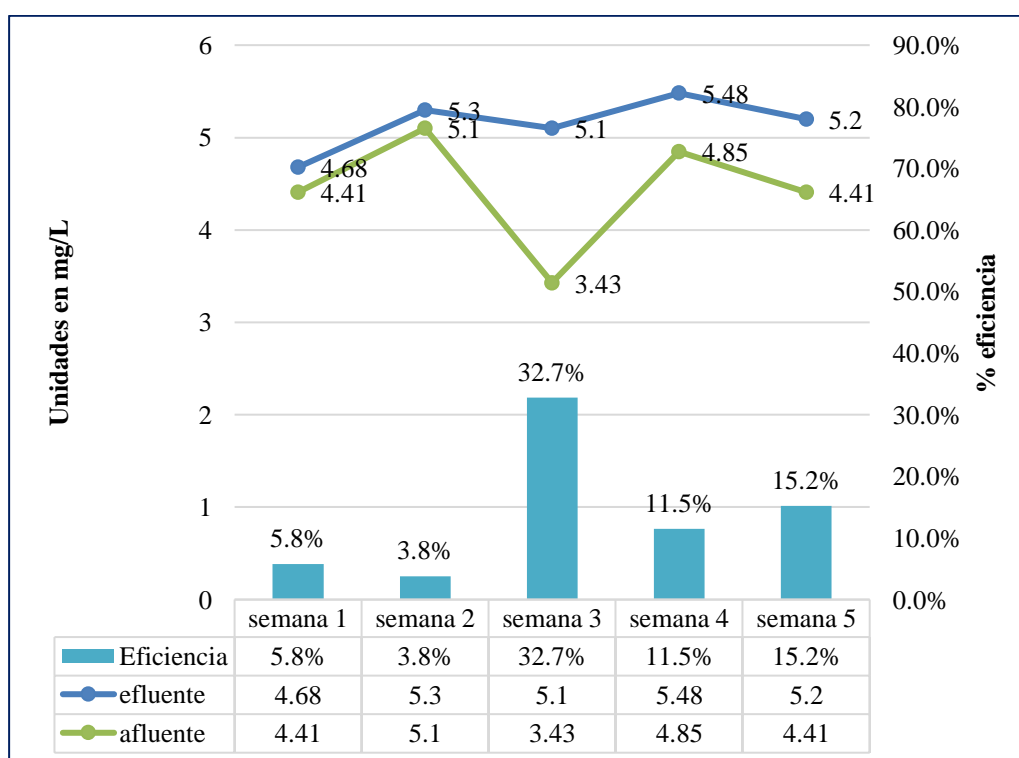
- **Eficiencia de remoción en fosfatos.**

En la figura 14, se puede apreciar el porcentaje de remoción del fosfato total. Se observa que la curva característica presenta es una curva creciente - decreciente - creciente, iniciando con una curva creciente, con un porcentaje alto de remoción positiva de 59.7 % en la semana 1, alcanzando un porcentaje de remoción creciente de 66.5 % en la semana 2 y una curva decreciente con un porcentaje de remoción de 25.2 % en la semana 3, llegando con una curva creciente positiva alta, con porcentaje de remoción de 68.9 % en la semana 4.



**Figura 14:** Eficiencia de remoción en fosfatos.

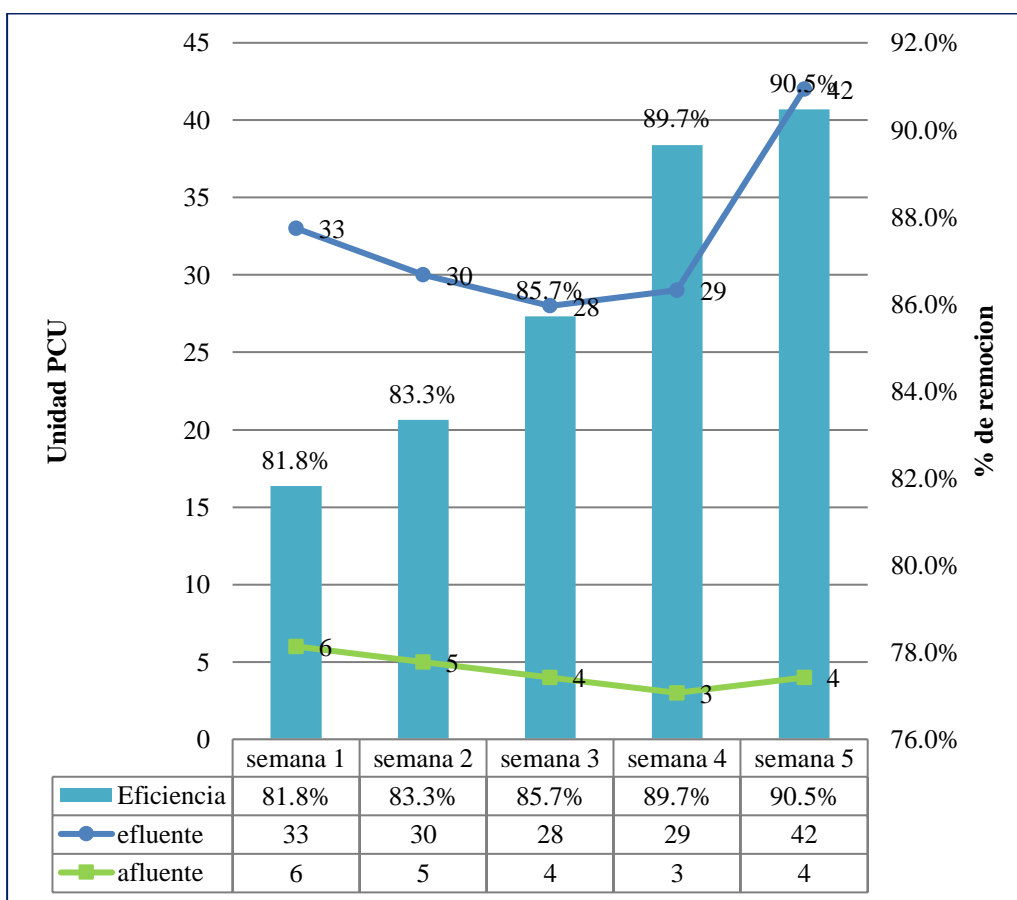
- Eficiencia del oxígeno disuelto (OD)**



**Figura 15:** Eficiencia de oxigenación

En la figura 15, se puede apreciar el porcentaje oxigenación. Se observa que la curva característica presenta, es una curva decreciente - creciente iniciando en la curva decreciente con un porcentaje de remoción de 5.8 % en la semana 1, y en la semana 3 se observa una curva creciente positiva con un porcentaje alto de remoción de 32.7 %, para la semana 4 llega a una remoción de 11.5 % y finalmente con una curva positiva de remoción de 15.2 %, en la semana 5.

- **Variación del color PCU(unidades platino cobalto)**

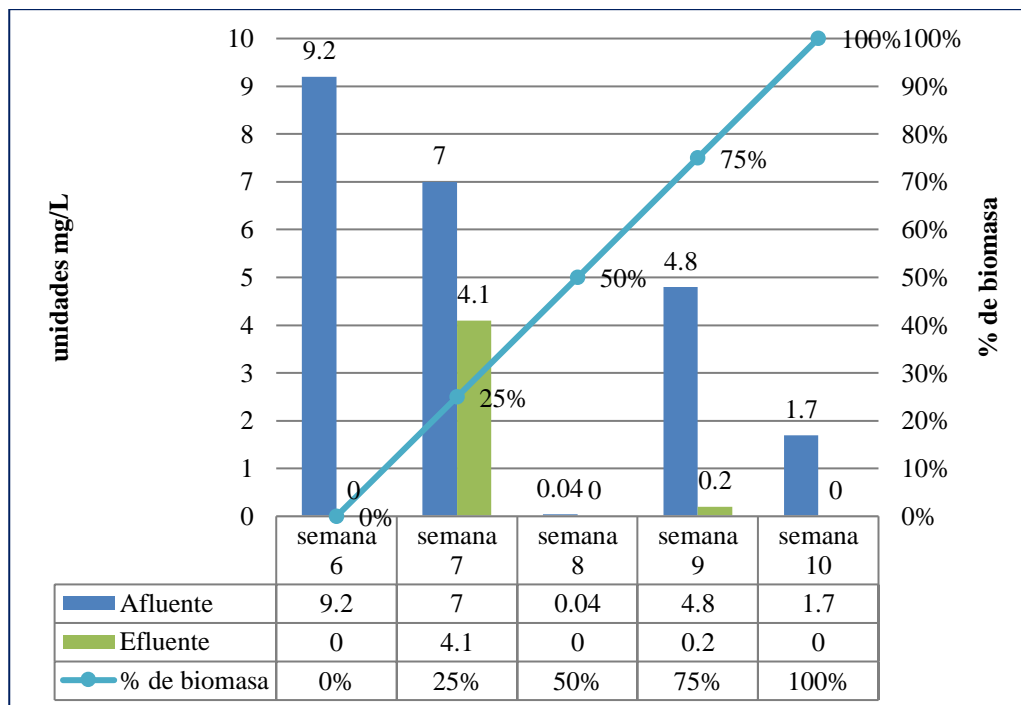


**Figura 16:** Eficiencia del color.

En la figura 16 se puede apreciar el porcentaje de variación del color. Se observa que la curva característica presenta es una curva creciente, iniciando la curva con un porcentaje creciente de remoción positiva con 81.8 % en la semana 1, y finalizando en la curva creciente positiva con un porcentaje de remoción de 90.5 % en la semana 5.

### 3.1.4. Comportamiento de los parámetros físico-químicos al manipular el porcentaje (0 %, 25%, 50%, 75% y 100%) de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*).

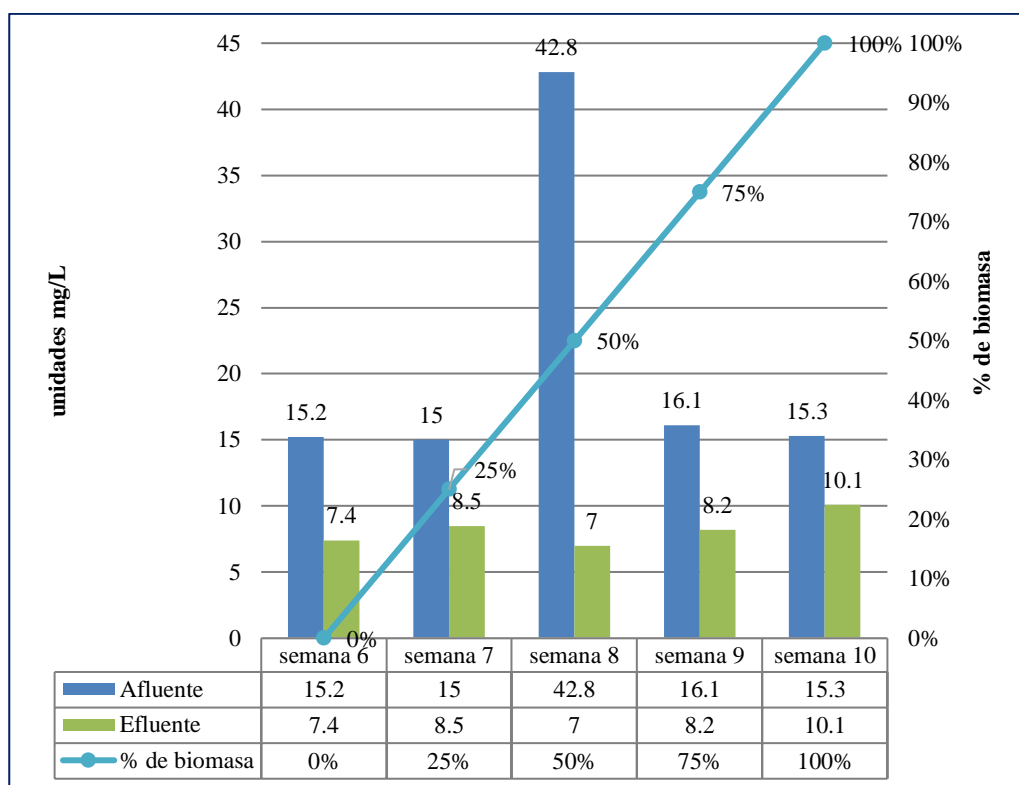
- Variación en nitratos.



**Figura 17:** Variación de concentración del nitrato.

En la figura 17 se puede apreciar la concentración de remoción del nitrato manipulando el porcentaje de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), al 0%, 25%, 50%, 75% y 100%. Se observa que la curva al 0% sin Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) presenta una concentración de remoción de 9.2 mg/L en el afluente a 0.0 mg/L en el efluente en la semana 6, y con 25% Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la concentración de remoción en el afluente es de 7 mg/L a 4.1mg/L en el efluente, al 50 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la concentración de remoción de nitratos en el afluente es de 0.04 mg/L a 0.0 mg/L en el efluente en la semana 8, al 75 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la concentración de nitratos en el afluente es de 4.8 mg/L con respecto a 0.2 mg/L en el efluente en la semana 9 y finalmente al 100 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la concentración de nitratos en el afluente es de 1.7 mg/L con respecto del efluente que tiene un valor de 0.00 mg/L en la semana 10. Se observa que la disminución positiva de la concentración de nitratos es manipulando el porcentaje de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), al 50%, 75%.

- Variación en fosfatos.

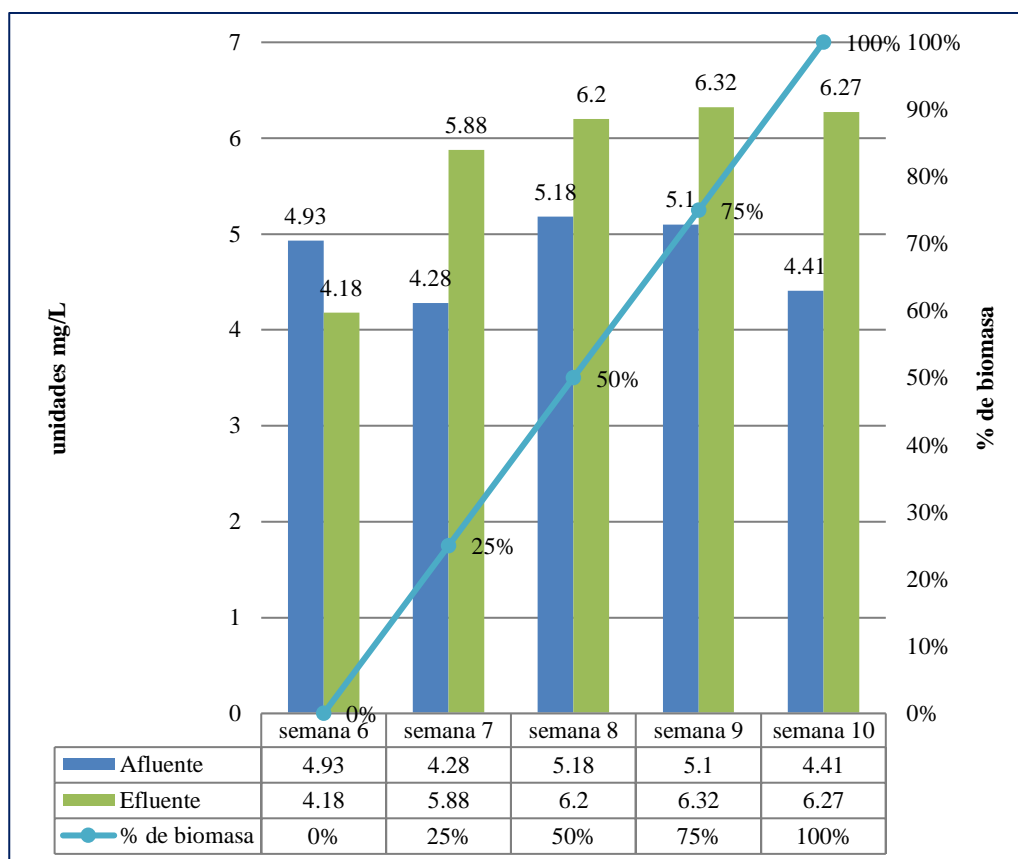


**Figura 18:** Variación de concentración del fosfato.

En la figura 18, se puede apreciar la concentración de remoción del fosfato manipulando el porcentaje de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), al 0%, 25%, 50%, 75% y 100%. Se observa que la curva al 0% sin Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) presenta una concentración de remoción en el de 15.2 mg/L. en el afluente a 7.4 mg/L. en el efluente en la semana 6, y con 25% de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la concentración de remoción en el afluente es de 15 mg/L a 8.5 mg/L. en el efluente, al 50 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la concentración de remoción de fosforo total en el afluente es de 42.8 mg/L. a 7 mg/L en el efluente en la semana 8, al 75 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la concentración de fosfato en el afluente es de 16.1 mg/L a 8.2 mg/L. en el efluente en la semana 9 y finalmente al 100 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la concentración de fosfato en el afluente es de 15.3 mg/L. con respecto del efluente que tiene un valor de 10.1 mg/L. en la semana 10.

Se observa que la disminución positiva de la concentración de fosfato es manipulando el porcentaje de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), al 50%, 75%.

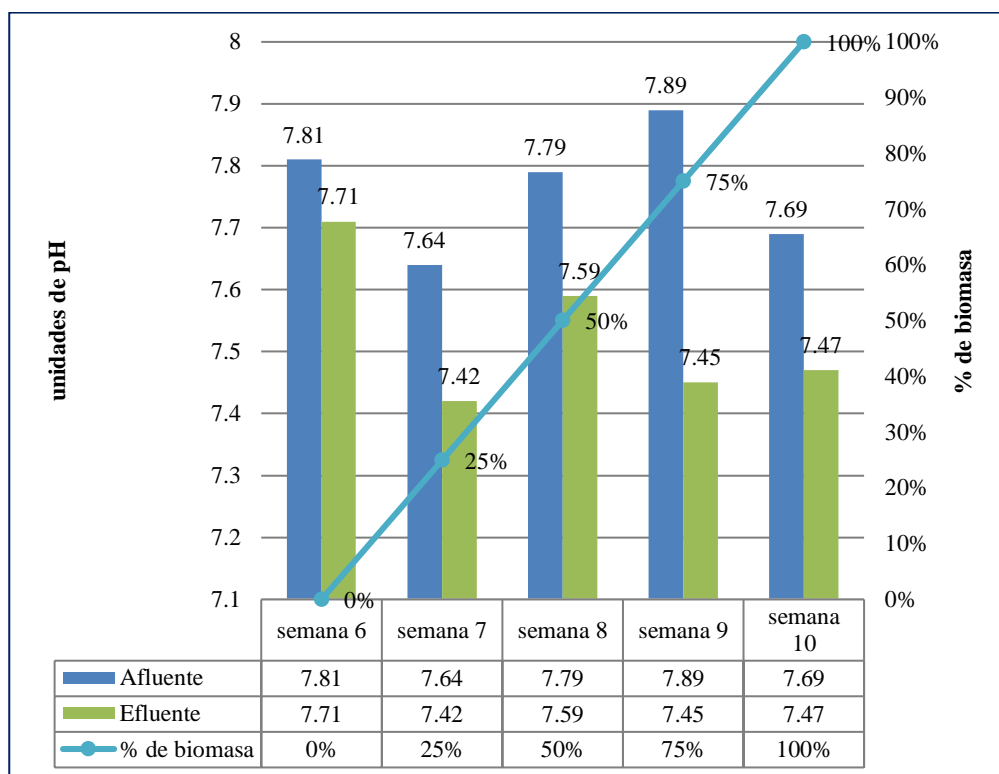
- Variación en oxígeno disuelto.



**Figura 19:** Variación en la concentración del oxígeno disuelto.

En la figura 19 se puede apreciar que el aumento y disminución del oxígeno disuelto manipulando el porcentaje de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), al 0%, 25%, 50%, 75% y 100%. Se observa que la curva al 0% sin Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), presenta una disminución de 4.93 mg/L. en el afluente a 4.18 mg/L en el efluente en la semana 6; con un 25% de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa el aumento del afluente es de 4.28 mg/L. a 5.88 mg/L en el efluente en la semana 7; al 50 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa el aumento es de 5.18 mg/L. en el afluente a 6.2 mg/L en el efluente en la semana 8; al 75 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa el aumento de oxígeno total en el afluente es de 5.1 mg/L. con respecto a 6.32 mg/L. en el efluente en la semana 9; y finalmente al 100 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que el oxígeno total en el afluente es de 4.41 mg/L. con respecto del efluente que tiene un valor de 6.27 mg/L. en la semana 10. Se observa que mayor aumento de oxígeno total, es manipulando el porcentaje de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), al 50%, 75%.

- Variación con el potencial de hidrógeno (pH).

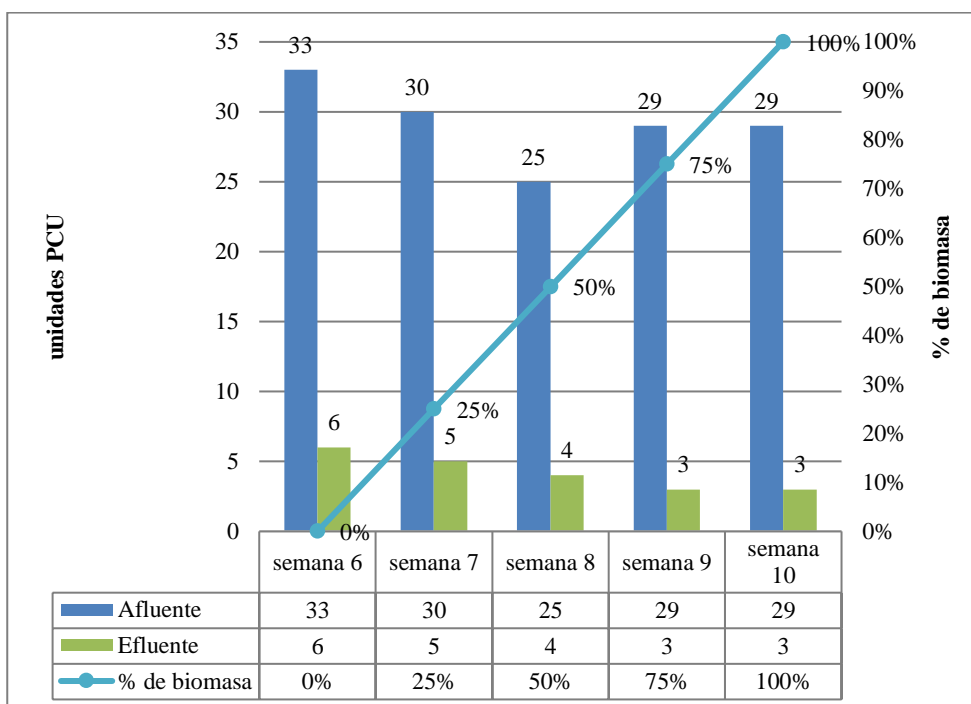


**Figura 20:** variación de resultados en el pH.

En la figura 20, se puede apreciar la variación del pH manipulando el porcentaje de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), al 0%, 25%, 50%, 75% y 100%. Se observa que la curva al 0% sin Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) presenta una concentración de remoción de 7.81 unidad de pH en el afluyente a 7.71 unidad de pH en el efluente en la semana 6, y con 25% de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la variación en el afluyente es de 7.64 unidad de pH a 7.42 unidad de pH en el efluente en la semana 7, al 50 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la variación de pH en el afluyente es de 7.79 unidad de pH a 7.59 unidad de pH en el efluente en la semana 8, al 75 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la variación de pH en el afluyente es de 7.89 unidad de pH a 7.45 unidad de pH en el efluente en la semana 9 y finalmente al 100 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la variación de pH en el afluyente es de 7.69 unidad de pH con respecto del efluente que tiene un valor de 7.47 unidad de pH en la semana 10.

Se observa que la disminución positiva de la variación de pH es manipulando el porcentaje de Jacinto de agua Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), al 50%, 75%.

- **Color (unidades platino cobalto).**



**Figura 21:** variación de resultados de color.

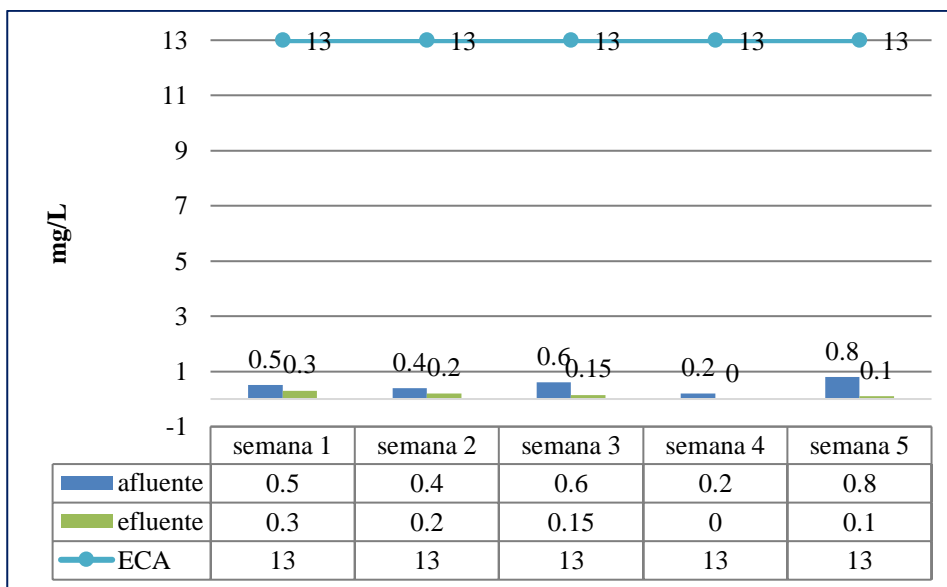
En la figura 21 se puede apreciar la variación del color manipulando el porcentaje de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), al 0%, 25%, 50%, 75% y 100%. Se observa que la curva al 0% sin Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) presenta una concentración de remoción de 33 unidades platino cobalto en el afluente a 6 PCU (unidades platino cobalto) en el efluente en la semana 6, y con 25% de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la variación en el afluente es de 30 unidades platino cobalto a 5 PCU (unidades platino cobalto) en el efluente en la semana 7, al 50 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la variación de color en el afluente es de 25 PCU (unidades platino cobalto) a 4 PCU (unidades platino cobalto) en el efluente en la semana 8, al 75 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la variación de color en el afluente es de 29 unidades platino cobalto a 3 PCU (unidades platino cobalto) en el efluente en la semana 9 y finalmente al 100 % de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), se observa que la variación de color en el afluente es de 29 PCU (unidades platino cobalto) con respecto al efluente que tiene un valor de 3 PCU, unidades platino cobalto en la semana 10.

Se observa que la disminución positiva de la variación de color es manipulando el porcentaje de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), al 50%, 75%.



### 3.1.5. Comparación de los análisis del agua filtrada con los estándares de calidad ambiental (ECA) para agua según el D.S N° 004-2017-MINAM, categoría 02, subcategoría C4.

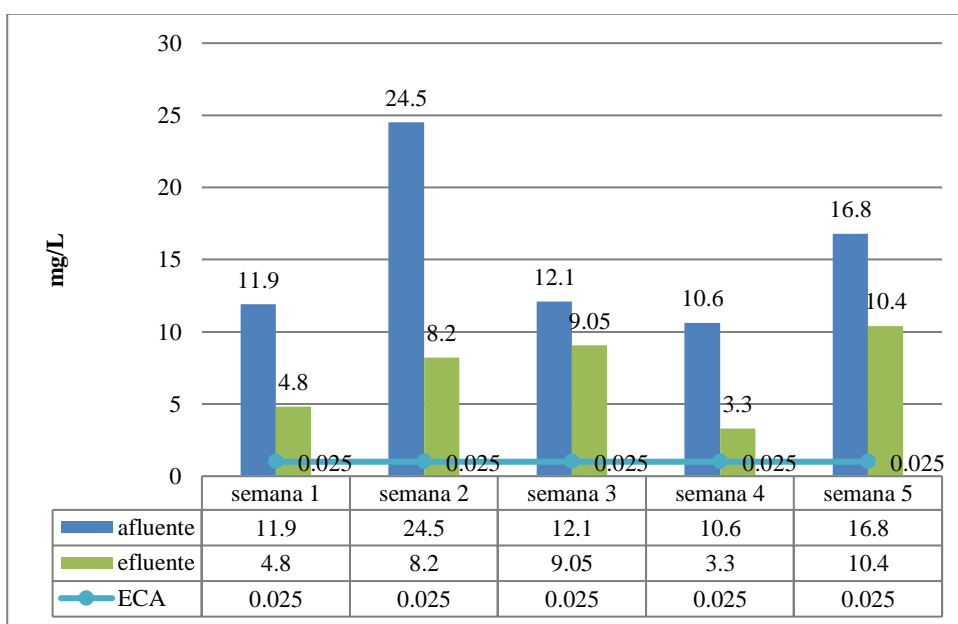
#### • Nitratos.



**Figura 22:** Niveles de concentración de Nitratos comparados con los ECA.

En la figura 22, se muestran los datos de nitratos obtenidos durante 5 semanas. Las muestras tomadas del efluente (barras de color verde) dando como valor promedio 0.15 mg/l. Se aprecia que los valores obtenidos, si cumplen con el ECA.

#### • Fosfatos.

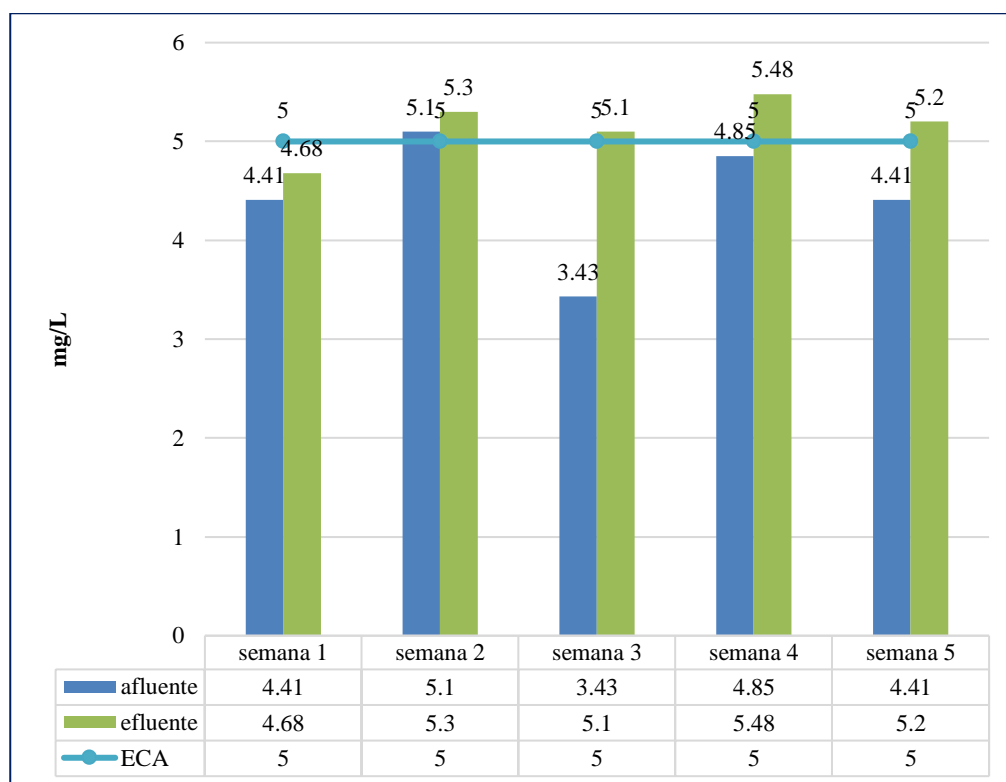


**Figura 23:** Niveles de concentración de fósforo total comparados con los ECA.

En la figura 23, se muestran los datos de fosfato obtenidos durante 5 semanas. Las muestras tomadas del efluente (barras de color verde) dando como valor promedio 7.15 mg/l. Se aprecia que los valores obtenidos no cumplen con el ECA.

- **Oxígeno disuelto (OD)**

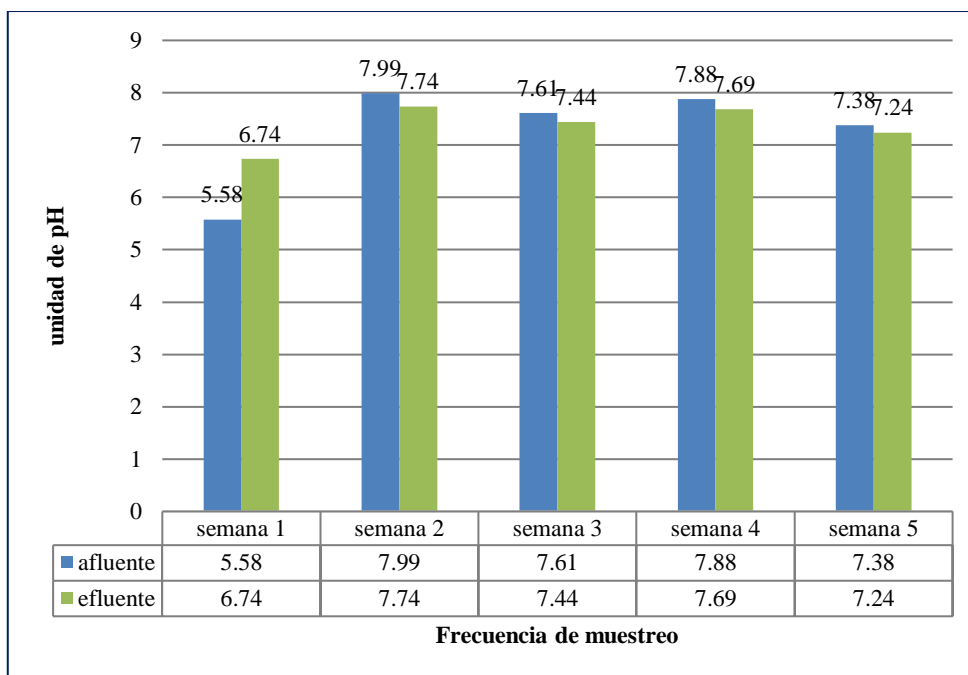
En la figura 24, se muestran los datos de oxígeno disuelto obtenidos durante 5 semanas. Las muestras tomadas del efluente (barras de color verde) dando como valor promedio 5.15 mg/l. Se aprecia que los valores obtenidos si cumplen con el ECA.



**Figura 24:** Niveles de concentración de oxígeno disuelto comparados con los ECA

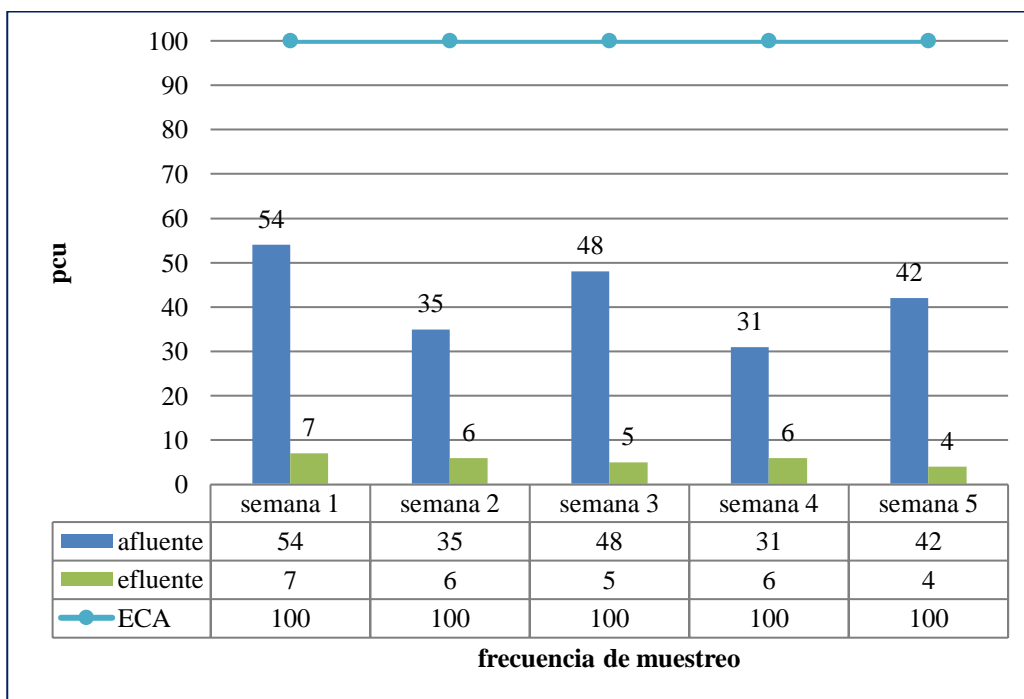
- **Potencial de hidrógeno (pH)**

En la figura 25, se muestran los datos de potencial de hidrogeno (pH) obtenidos durante 5 semanas. Las muestras tomadas del efluente (barras de color verde) dando como valor promedio 7.37 unidades de pH. Se aprecia que los valores obtenidos si cumplen con el ECA.



**Figura 25:** Niveles de variación de potencial de hidrogeno (pH) comparados con los ECA.

- **Color PCU (unidades platino cobalto)**



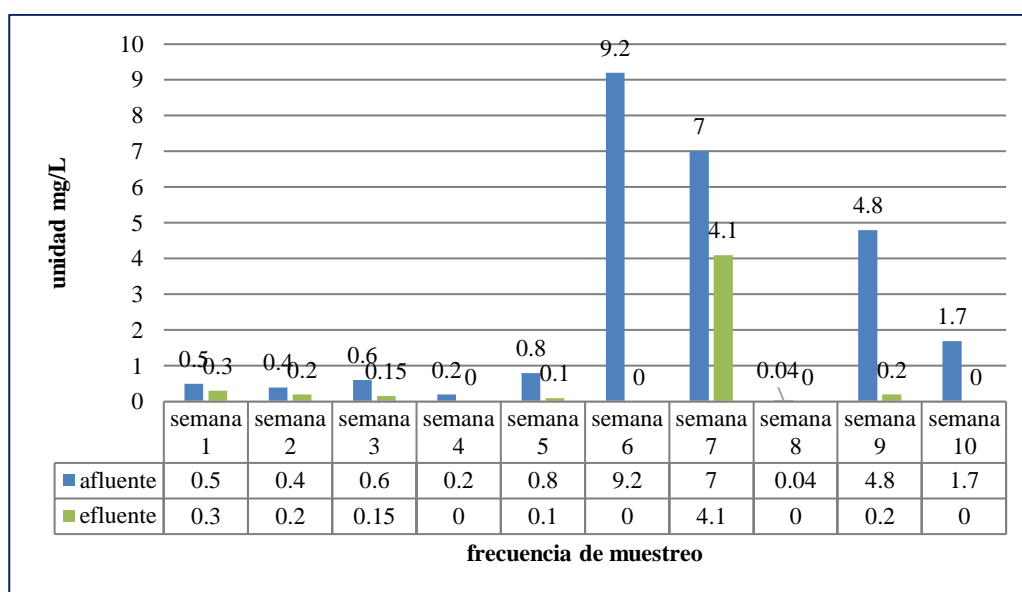
**Figura 26:** Niveles de variación de color comparados con los ECA.

En la figura 26, se muestran los datos de color obtenidos durante 5 semanas. Las muestras tomadas del efluente (barras de color verde) dando como valor promedio 5.6 unidades platino cobalto. Se aprecia que los valores obtenidos si cumplen con el ECA.

### 3.1.6. Resumen general de análisis totales (nitratos, fosfatos oxígeno disuelto, pH, color, durante las 10 semanas.

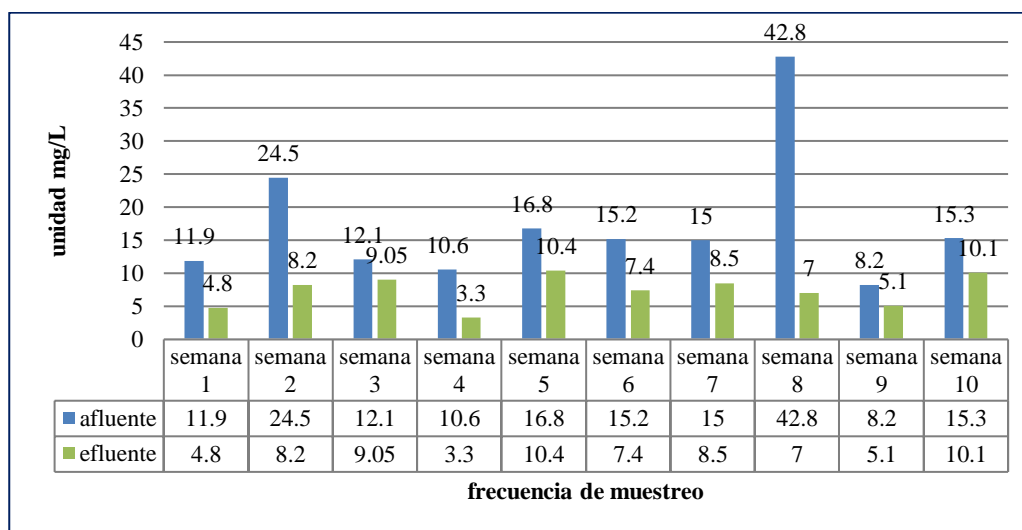
- **Para los nitratos**

En la figura 27, se muestran los datos de nitratos obtenidos durante las 10 semanas. Se puede observar la frecuencia del nivel de concentración de nitratos al afluente (barras de color azul) dando un valor promedio de 2.52 mg/L; y en el post tratamiento se observa que el nivel de concentración de nitratos, tiene resultados significativos en el efluente (barras de color verde) dando como valor promedio 0.50 mg/L.



**Figura 27:** Análisis de nitrato durante las diez (10) semanas de muestreo.

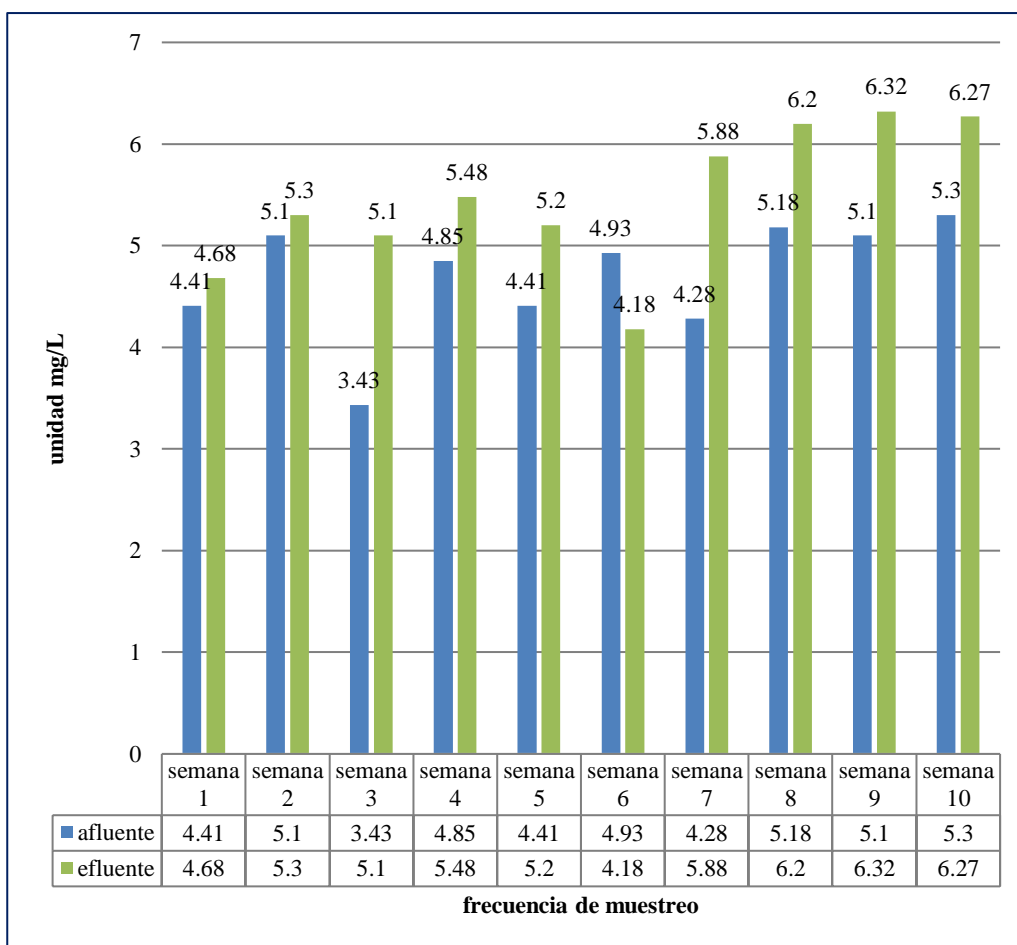
- **Para los fosfatos.**



**Figura 28:** Análisis de fósforo total durante las diez (10) semanas de muestreo.

En la figura 28, se muestran los datos de fósforo total obtenidos durante las 10 semanas. Se puede observar la frecuencia del nivel de concentración de fósforo total al afluente (barras de color azul) dando un valor promedio de 17.24 mg/L; y en el post tratamiento se observa que el nivel de concentración de fósforo total, tiene resultados significativos en el efluente (barras de color verde) dando como valor promedio 7.38 mg/L.

- **Para el oxígeno disuelto (OD)**

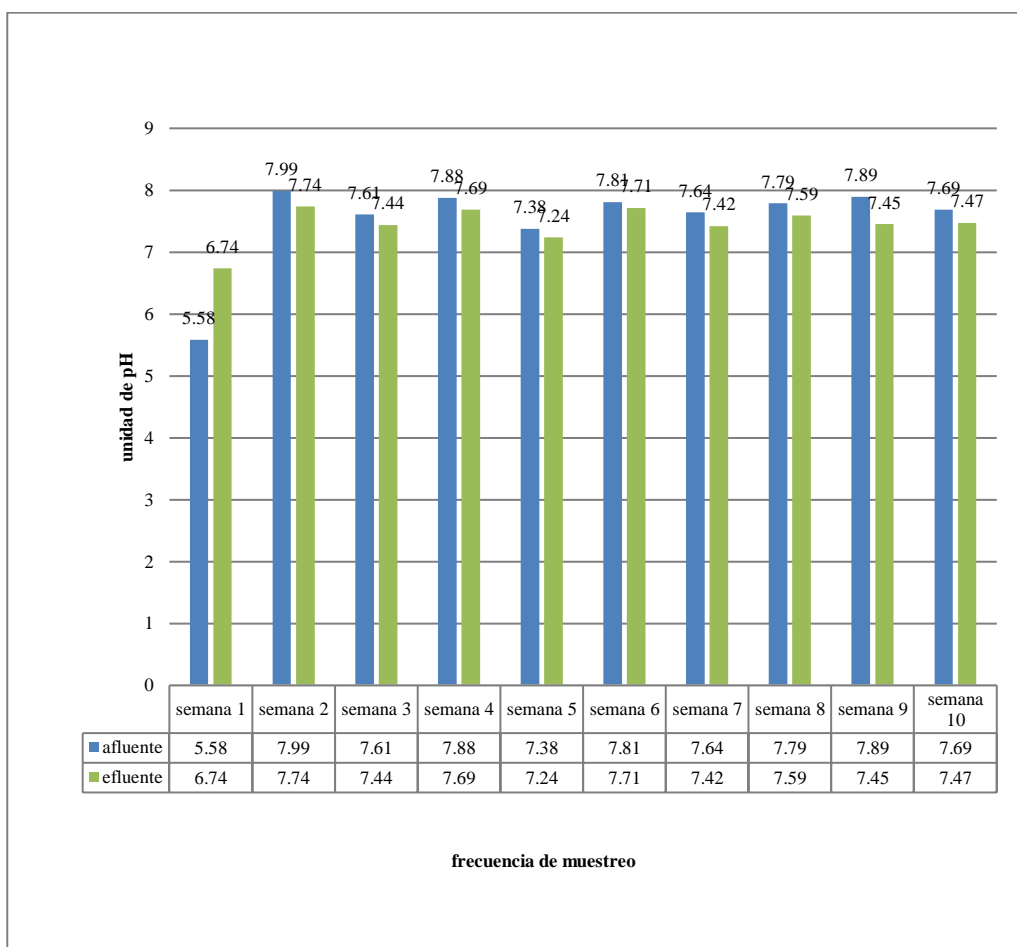


**Figura 29:** Análisis de oxígeno disuelto durante las diez (10) semanas de muestreo.

En la figura 29, se muestran los datos de oxígeno disuelto obtenidos durante las 10 semanas. Se puede observar la frecuencia del nivel de concentración de oxígeno disuelto en el afluente (barras de color azul) dando un valor promedio de 4.69 mg/L; y en el post tratamiento se observa que el nivel de concentración de oxígeno disuelto, tiene resultados significativos en el efluente (barras de color verde) dando como valor promedio 5.46 mg/L.

- **Para el potencial de hidrógeno.**

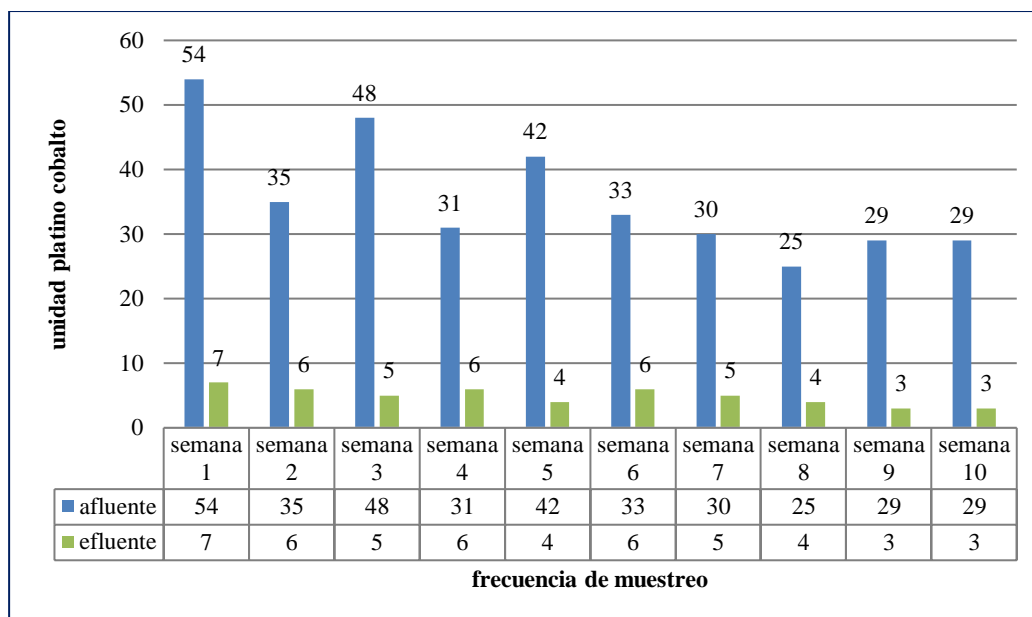
En la figura 30, se muestran los datos de pH obtenidos durante las 10 semanas. Se puede observar la frecuencia del nivel de variación de pH en el afluente (barras de color azul) dando un valor promedio de 7.52 unidades de pH; y en el post tratamiento se observa que el nivel de variación de pH, tiene resultados significativos en el efluente (barras de color verde) dando como valor promedio 7.44 unidades de pH.



**Figura 30:** Análisis de la variación de pH, durante las diez (10) semanas de muestreo.

- **Para el color**

En la figura 31, se muestran los datos de color verdadero obtenidos durante las 10 semanas. Se puede observar la frecuencia del nivel de variación del color en el afluente (barras de color azul) dando un valor promedio de 35.6 unidades platino cobalto; y en el post tratamiento se observa que el nivel de variación del color verdadero, tiene resultados significativos en el efluente (barras de color verde) dando como valor promedio 4.9 PCU (unidades platino cobalto).

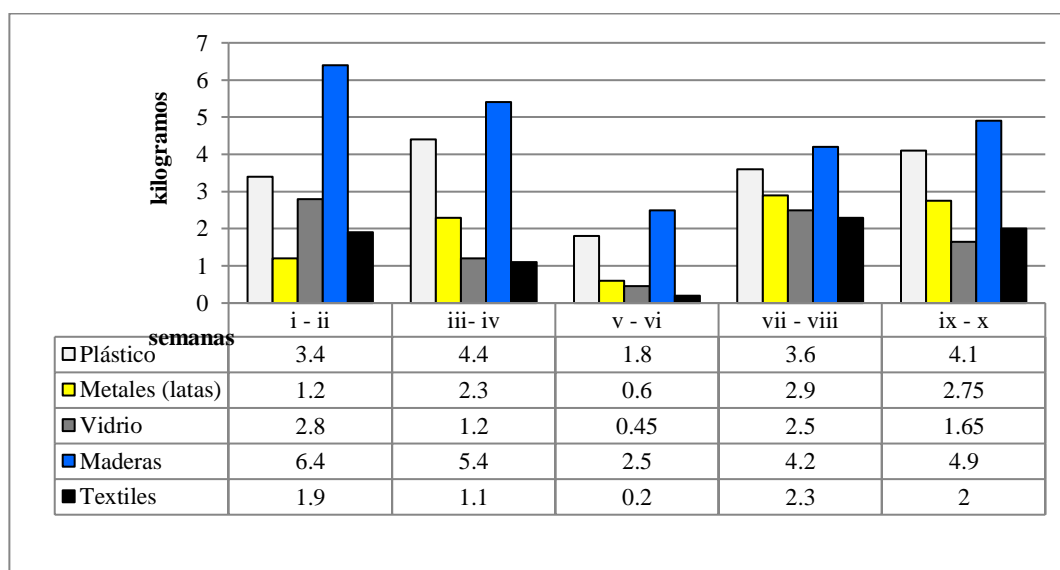


**Figura 31:** Análisis de variación de color durante las diez (10) semanas de muestreo.

### 3.1.7. Resultados del material antropogénico captados por el sistema

Con la colocación de un flotador transversal en el cauce principal de la quebrada, el material de origen antropogénico se desvió al canal que conduce al sistema el cual es retenido por un deflector, tendiendo como resultado el siguiente gráfico.

En la figura 32, se puede apreciar la gran cantidad de material de origen antropogénico. Se observa que los primeros quince días hubo una concentración debido a que antes de poner en evaluación al sistema, se tuvo que limpiar aguas arriba de la quebrada. La semanas 5 y 6 se puede apreciar hubo menos cantidad, debido a las épocas de estiajes.



**Figura 32:** Segregación del material de origen antropogénico captado por el sistema de humedal.

**3.1.8. Evaluación basada en la normativa estándares de calidad ambiental para agua  
D.S N° 004-2017-MINAM, categoría 02, subcategoría C4.**

**Tabla 6**

*Contrastación del efluente en los estándares de calidad ambiental (ECA).*

Tiempo	Fecha	Parámetro	Unidad	Valor efluente	Valor ECA	Condición
Semana 1	11/03/2019	Nitratos	(mg/L)	0.30	13.0	Si cumple
		Fosfatos	(mg/L)	4.80	0.025	No cumple
		Oxígeno disuelto	Mg/L	4.68	≥5	No cumple
		pH	pH	6.74	6 - 9	Si cumple
		Color	Unidad platino cobalto	7.00	100	Si cumple
Semana 2	18/03/2019	Nitratos	(mg/L)	0.20	13,0	Si cumple
		Fosfatos	(mg/L)	8.20	0.025	No cumple
		Oxígeno disuelto	Mg/L	5.30	≥5	Si cumple
		pH	pH	7.74	6 - 9	Si cumple
		Color	Unidad platino cobalto	6.00	100	Si cumple
Semana 3	25/03/2019	Nitratos	(mg/L)	0.15	13,0	Si cumple
		Fosfatos	(mg/L)	9.05	0.025	No cumple
		Oxígeno disuelto	Mg/L	5.10	≥5	Si cumple
		pH	pH	7.44	6 - 9	Si cumple
		Color	Unidad platino cobalto	5.00	100	Si cumple
Semana 4	01/04/2019	Nitratos	(mg/L)	0.00	13,0	Si cumple
		Fosfatos	(mg/L)	3.30	0.025	No cumple
		Oxígeno disuelto	Mg/L	5.48	≥5	Si cumple
		pH	pH	7,69	6 - 9	Si cumple
		Color	Unidad platino cobalto	6.00	100	Si cumple
Semana 5	08/04/2019	Nitratos	(mg/L)	0.1	13,0	Si cumple
		Fosfatos	(mg/L)	10.4	0.025	No cumple
		Oxígeno disuelto	Mg/L	5.20	≥5	Si cumple
		pH	pH	7.24	6 - 9	Si cumple
		Color	Unidad platino cobalto	4.00	100	Si cumple

*Nota:* Comparación con los valores del anexo D, fuente: elaboración propia, 2019

De la tabla 6, la evaluación basada en el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental (ECA) según el D.S. N° 04-2017- MINAM, categoría 02, subcategoría C4. Podemos afirmar que el sistema de flujo subsuperficial ha mejorado parcialmente la calidad del agua de la quebrada hierbabuena, no cumpliendo con el parámetro de fosfatos, pero si viéndose considerablemente en el porcentaje de remoción.



### 3.1.9. Evaluación basada en el análisis estadístico (t- Student para dos muestras independientes).

- Para los nitratos

**Tabla 7**

*Análisis de nitratos en 5 muestras.*

Muestra	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana5
Afluente	0.5	0.4	0.6	0.2	0.8
Efluente	0.3	0.2	0.15	0.0	0.1

Nota: datos del muestro semanal

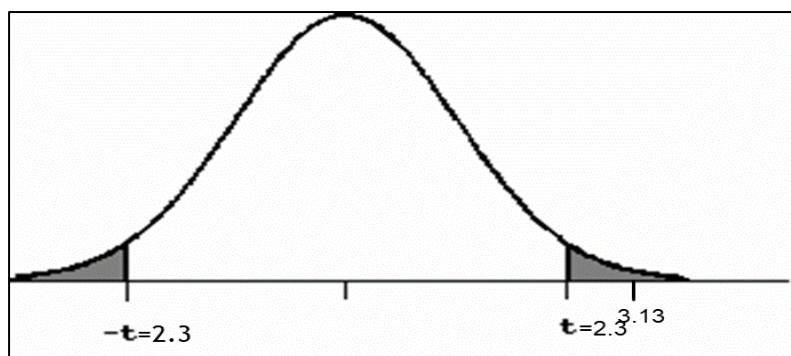
**Tabla 8**

*Prueba t para dos muestras independientes de nitratos.*

Muestra	Afluente (Entrada)	Efluente (Salida)
Media	0.5	0.15
Varianza	0.05	0.0125
Observaciones	5	5
Varianza agrupada	0.0313	
Hipótesis alternativa $H_1$	MA>ME	-----
Hipótesis nula $H_0$	MA<ME	-----
Nivel de confianza	95%	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	3.1305	
P(T<=t) dos colas	0.0140	
Valor crítico de t (dos colas)	2.3060	

Nota: El cálculo estadístico se elaboró en el programa de Microsoft Excel, MA: muestra del afluente, ME: muestra del efluente.

Según la tabla 8, dado que el estadístico t (3.13) es mayor que el nivel crítico (2.30), se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa; además, el P- Valor (0.014) es menor a 0.05; Sustentando así, de que el sistema de humedal de flujo subsuperficial mejora la calidad de agua de la quebrada hierbabuena, tributario a la laguna de Pomacochas, concerniente a nitratos.



**Figura 33:** Prueba de hipótesis de dos colas para nitratos

- **Para los fosfatos**

**Tabla 9**

*Análisis de fosfatos en 5 muestras.*

Muestra	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
Afluente	11.9	24.5	12.1	10.6	16.8
Efluente	4.8	8.2	9.05	3.3	10.4

Nota: datos del muestro semanal

**Tabla 10**

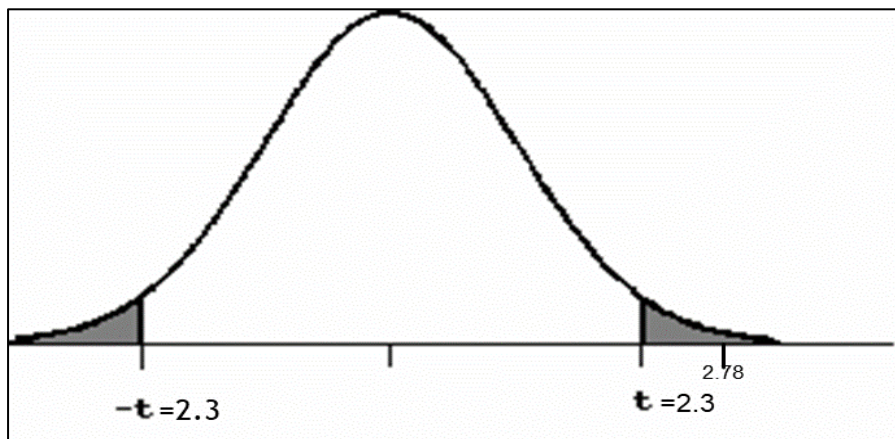
*Prueba t para dos muestras independientes de fosfatos.*

Muestra	Afluente (Entrada)	Efluente (Salida)
Media	15.18	7.15
Varianza	32.6770	8.905
Observaciones	5	5
Varianza agrupada	20.791	
Hipótesis alternativa $H_1$	MA>ME	-----
Hipótesis nula $H_0$	MA<ME	-----
Grados de libertad	8	
Estadístico t	2.7845	
P(T<=t) dos colas	0.0238	
Valor crítico de t (dos colas)	2.3060	

Nota: El cálculo estadístico se elaboró en el programa de Microsoft Excel, MA: muestra del afluente, ME: muestra del efluente.

Según la tabla 10, dado que el estadístico t (2.78) es mayor que el nivel crítico (2.30), se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa; además, el

P- Valor (0.023) es menor a 0.05; Sustentando así, de que el sistema de humedal de flujo subsuperficial mejora la calidad de agua de la quebrada hierbabuena, tributario a la laguna de Pomacochas, concerniente a fosfatos.



**Figura 34:** Prueba de hipótesis de dos colas para fosfatos.

### 3.1.10. Resultado de lodos retenidos en el sistema y su tratamiento

En los sedimentadores del sistema se captaron la mayoría de lodos, de las cuales para cerciorarse de que estos lodos no contengan metales pesados, se tuvo que analizar en un laboratorio de rayos X con el apoyo de una empresa privada de la región, teniendo el siguiente resultado en la siguiente tabla.

**Tabla 11**

*Análisis de lodos obtenidos en el sistema de humedal.*

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
17.86	11.65	5.40	13.05	0.01	0.14	0.203

K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	SrO
2.25	0.315	0.007	0.098	0.008	0.000	0.014

Nota: datos obtenidos de laboratorio de rayos X, Empresa privada de la región.

Este dato nos permitió establecer la disposición final de los lodos, el cual será secado a temperatura ambiente y posterior utilidad en la agricultura.

### 3.2. Discusiones

Juárez (2018), detalla en sus conclusiones de su investigación llamado “Evaluación del humedal artificial de lecho fluidizado ascendente con macrofita flotante, en la remoción de aguas residuales del matadero municipal de la ciudad de Moyobamba 2017” El diseño del humedal artificial a nivel piloto, lo diseñó en un tanque de forma cilíndrica de 1,15 m de altura, 0,86 m<sup>2</sup> de área superficial, 0,97 m<sup>3</sup> de volumen, con capacidad de 100,0 L/día y un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 6,07 días; Además, usa como componentes del tanque son el lecho fluidizado son con grava y arena gruesa, También instaló una campana separadora de gases-sólido-líquido (GSL) y las plantas acuáticas *Eichhornia crassipes spp.* En la caracterización de los parámetros fisicoquímicos presentaron variaciones en afluente y efluente, obteniéndose resultado en aumento de 1,9 ppm en nitratos y 25,9 ppm en fosfatos y 3,3 ppm en oxígeno disuelto comparando finalmente que la concentración de parámetros obtenidos están por debajo de los valores máximos admisibles (VMA).

Mientras tanto, en la presente investigación se consideró un el sistema de humedal de forma semihexagonal con dimensiones de 0,85 m de altura, 5,40 m<sup>2</sup> de área superficial y 4,6 m<sup>3</sup> de volumen con un tiempo de retención de 1.8 minutos, usando el mismo sustrato de grava gruesa, mediana y arena fina. Además, se instaló un deflector para retener materiales de origen antropogénico. En los resultados de los análisis físico-químicos se obtiene una disminución en los parámetros de nitrato de 0.8 mg/L a 0.1 mg/L.; para los fosfatos de 10.6 mg/L. a 3.6 mg/l.; para el potencial de hidrógeno con una variación de 6 a 7.99; para el color de 54 PCU a 7 PCU y por último, para el oxígeno disuelto en aumento de 3.43 mg/L. a 5.1 mg/L. comparando finalmente en este caso con los ECAs para agua según el DS N° 004-2017-MINAM, teniendo resultados considerables.

(Medina y López 2013), en su trabajo de investigación construyeron un humedal artificial utilizando la especie *Arundo donax* (Caña Brava) para determinar los parámetros físico- químicos y biológicos de las aguas residuales (DBO<sub>5</sub>, DQO, pH, sólidos en suspensión, temperatura y turbiedad) pre y post. Los análisis obtenidos en el efluente para la turbiedad del agua residual doméstica varía entre 65 y 88 UNT, la DBO varía entre 218 y 248 mg/L, en cuanto a los coliformes fecales los valores están entre 5745 y 5617 UFC/100ml y para los sólidos totales en suspensión los valores oscilan

entre 185 y 215 mg/L. los efluentes que salen del humedal artificial tienen una turbiedad del agua residual domestica tratada varía entre 4.5 y 15 NTU, la DBO varía entre 161 y 97mg/L, en cuanto a los coliformes fecales los valores están entre 15 y 3541 UFC/100ml y para los sólidos totales en suspensión los valores oscilan entre 23 y 45 mg/L. se tuvo un muestreo mensual logrando que hasta el tercer mes cumpliera con los Límites Máximos Permisibles. Por lo que se puede concretar que los humedales artificiales contribuyen en el mejoramiento de la calidad físico-química de las aguas residuales domésticas, quebradas y otros cuerpos receptores cumpliendo parámetros y estándares establecidos por el Ministerio del Ambiente.

Arivoli (2013) indica en su trabajo de investigación “eficiencia de la *Typha angustifolia* construido en un humedal de flujo vertical para la reducción de contaminantes de las aguas residuales domésticas”. El análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos fueron la siguiente: La turbidez, pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, fosfatos y nitratos. Para la construcción del humedal artificial vertical se elaboraron dos camas, la primera contiene a la especie *Typha angustifolia* y la segunda no tiene vegetación, pero sirve como un control. Para el funcionamiento de los humedales se realizó 3 formas de retención hidráulica: 12, 24 y 36 horas. El porcentaje de remoción para el humedal se dio en un 70% de la mayoría de los parámetros. Mientras que en la presente investigación se realizó en los parámetros (nitratos, fosfatos, oxígeno disuelto, pH y color) obteniendo un 80% de remoción en el sistema de humedal.

## CONCLUSIONES

La evaluación del sistema de humedal de flujo subsuperficial concluye que si mejora la calidad físico-química del agua de la quebrada Hierbabuena tributario de la laguna de Pomacochas, Florida; demostrándose con los datos de los análisis realizados y comparación con los Estándares de Calidad Ambiental para agua, según el D.S N° 004- 2017- MINAM, categoría 02, subcategoría C4.

El diseño del sistema de humedal de flujo subsuperficial a escala 1:100, con un caudal medio de 1 L/s. Tiene la forma semihexagonal con dimensiones para el caudal y volumen de agua, 0.85 m de altura, área 5.40 m<sup>2</sup> y de volumen total de 4.6 m<sup>3</sup> con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 1.8 minutos, dividido en dos compartimentos y un canal bypass para épocas de máximas avenidas, además cada compartimento se divide en un sedimentador y una cámara de filtro. En la superficie del sistema se ubica el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) representando el 50% a 75% del área superficial, dato que representa la mayor eficiencia según la investigación.

En el análisis de las muestras de agua tomadas en el afluente y efluente en el sistema de humedal de flujo subsuperficial, teniendo los mejores resultados de remoción tal como se observa para el nitrato según la figura N° 8 y semana 5, con eficiencia de remoción del 87.5 %; para los fosfatos según la figura N° 9 y semana 4, con eficiencia de remoción del 68.9%; para el oxígeno disuelto según la figura 10 y semana 3, con eficiencia de oxigenación del 32.7%; para el potencial de hidrógeno con una variación de 6 a 7.99; por último el color según la figura 12 y semana 5, Con eficiencia de remoción de 87%.

Para la comparación de los resultados con los (ECA) según el D.S. N° 04-2017- MINAM, categoría 02, subcategoría C4. Se concluye que el sistema de humedal de flujo subsuperficial cumple con los parámetros físico-químicos, tales como para nitratos, oxígeno disuelto, pH y color; no cumpliendo con el fosfato, pero se observa un remoción significativa del 83.6%. Finalmente se acepta la hipótesis alternativa.

## RECOMENDACIONES

Para obtener un diseño del humedal artificial subsuperficial a escala real, tendría que replantearse el cálculo matemático y su dimensionamiento, teniendo en cuenta el tiempo de retención y la inclusión de un proceso de aireación a la entrada del sistema, para una mejor remoción de los parámetros físico-químicos.

Para posteriores investigaciones, realizar otros parámetros físico-químicos que no se estudiaron en el presente proyecto de investigación, adecuada a los Estándares de Calidad Ambiental para agua, según el (Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, 07 de junio de 2017) categoría 02, subcategoría C4, con la finalidad de tener una amplia gama de resultados en la remoción o incremento de parámetros en el efluente final.

A futuros investigadores seguir experimentando con los humedales artificiales con flujo vertical; teniendo en cuenta el caudal constante y con otras especies acuáticas.

A los gobiernos locales de distrito de Florida, tales como la municipalidad, Comunidad Campesina San Lucas de Pomacochas y la Asociación de Pescadores de Florida (ASPESFLOR), tener en cuenta esta investigación como una alternativa de solución ante la problemática contaminación que viene enfrentando la laguna de Pomacochas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ANDRADE, M, y otros.** *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales.* 2010.

**ARIAS, O.** *Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial.* Universidad Politécnica de Catalunya. Tesenia : s.n., 2004.

**ARIVOLI, a y MOHANRAJ, r.** *Eficiencia de la Typha angustifolia construido en un humedal de flujo vertical para la reducción de contaminantes de las aguas residuales domésticas.* Tamilnadu, India, 2013. Vol. 3.

**BAIONA.** *Ordenanza municipal de uso eficiente del agua en el Ayuntamiento de Baiona.* 2011.

**BEDOYA, ARDILA y & REYES.** *Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquía, Colombia.* México : Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 2014. págs. 275-283. Vol. 30.

**CENTA), REAL, A.** *Manual para la implementación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones.* ministerio del medioambiente y medio rural y marino. 2010.

**COOPER, P.** *Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment, WRC, Swindon.* 1996.

**Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM.** *Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias.* Perú. s.l. : Diario el peruano, 07 de junio de 2017.

**DELGADILLO.** *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales.* Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro Agua). Cochabamba : 978-99954-766-2-5 , 2010.

**EPA.** *Tecnología de aguas residuales. Humedales de Flujo subsuperficial.* 2000. 832-F-00-023.

**Environmental Protection Agency – EPA.** *Humedales de flujo subsuperficial.* Madrid, España, 1999.



**KANTAWANICHKUL, s y WANNASRI, s.** *Tratamiento de aguas residuales por flujo subsuperficial horizontal y vertical en sistemas de humedales construidos en climas tropicales.* Bangkok, Tailandia : Songklanakarin J, 2013. págs. 599 – 603.

**KOLB, P.** *esign of a constructed wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós, Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur. Universitat fur Bodenkultur.* 1998.

**LARA, J.** *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales.* Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España, 1999.

**LONDOÑO, L y MARÍN, C.** *Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética.* Pereira, 2009.

**MARA.** *Aguas Residuales y Tratamiento de Efluentes Cloacales Tratamiento de efluentes, caracterización, generalidades, definición y origen.* 2000.

**MEDINA y LÓPEZ.** *Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante humedales artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies Cyperus papyrus y Phragmites australis, en Carapongo.* Moyobamba., 2013.

**MENA, J y SANZ.** *Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos.* Madrid, España, 2008. CONAMA 9, Congreso Nacional del Medio Ambiente, Cumbre del Desarrollo Sostenible..

**RAMALHO, R.** *Eliminación biológica de fósforo en aguas residuales urbanas.* España : niversidad de Castilla – La Mancha, 1993. pág. 9.

**REYNOLDS, K.** *Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica.* Arizona : De La Llave, 2002.

**RIVAS MIJARES, G.** *Tratamiento de aguas residuales,* 1978.

**ROLIM, S.** *Sistemas de Lagunas de estabilización. Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío.* Universidad Javeriana. [ed.] Institute of Technology. Bogotá : Mc Graw Hil, 2000.

**ROMERO.** *Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño.* 4ª. Bogotá : Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004. pág. 1248.

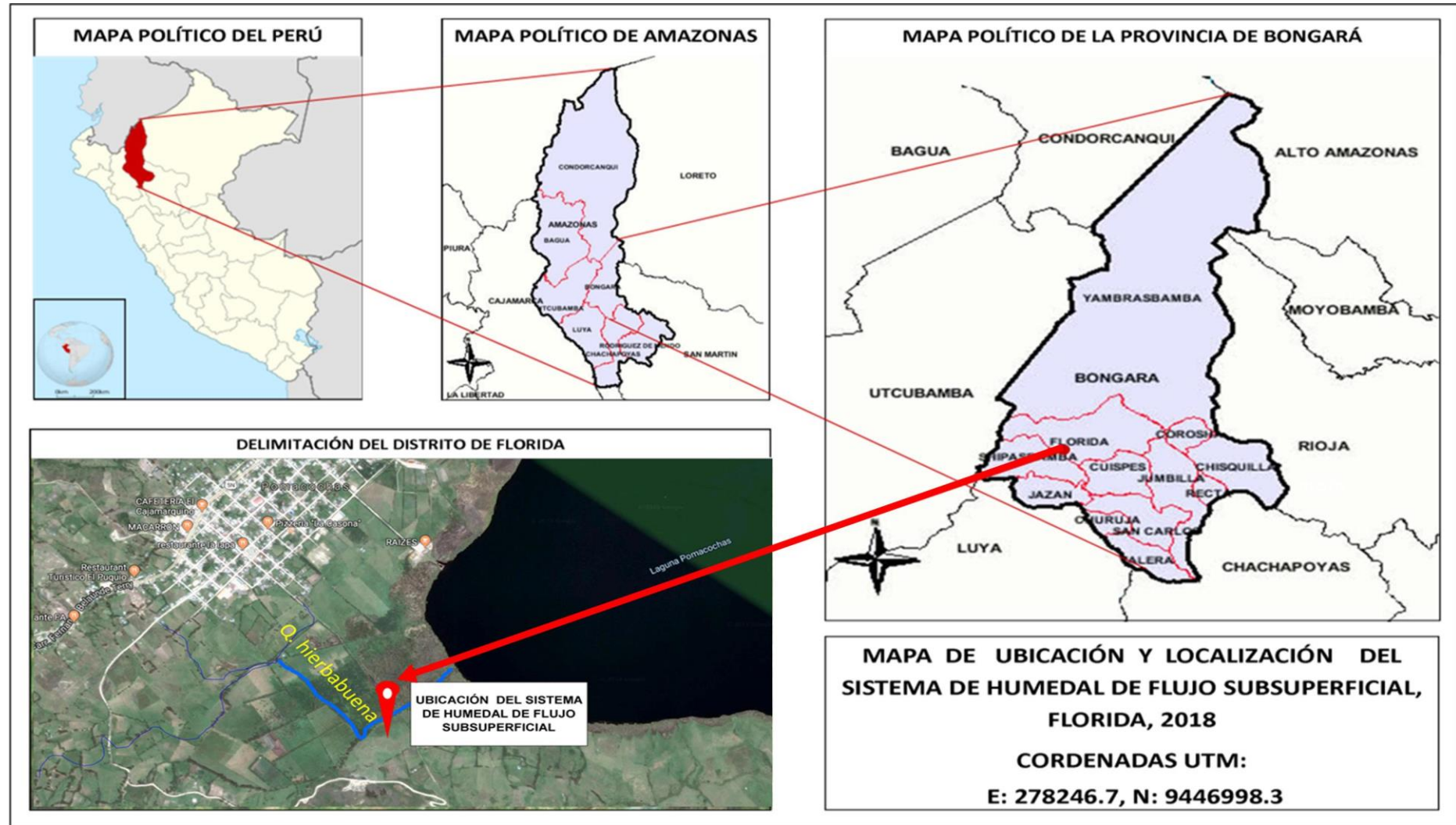
**SALVADOR JUÁREZ CHOTA, Luis.** *“Evaluación del humedal artificial de lecho fluidizado ascendente con macrofita.* Moyobamba, 2018.

**SEBASTIAN.** *constituyentes en las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos.* 2014.

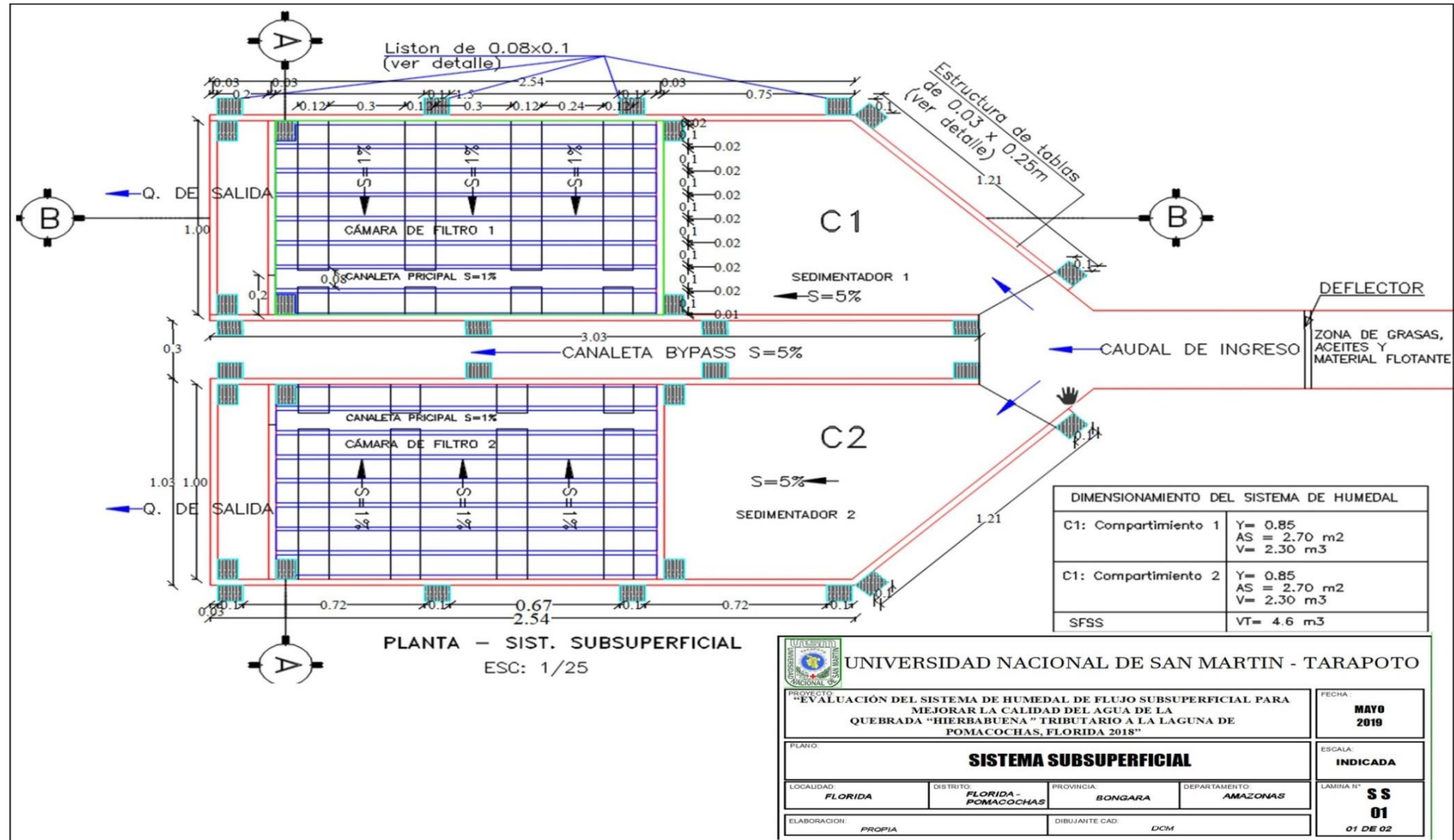
**YÑEZ COSSIO , F.** *MANUAL de métodos experimentales “Evaluación de Lagunas de Estabilización”.* 1983.

## **ANEXOS**

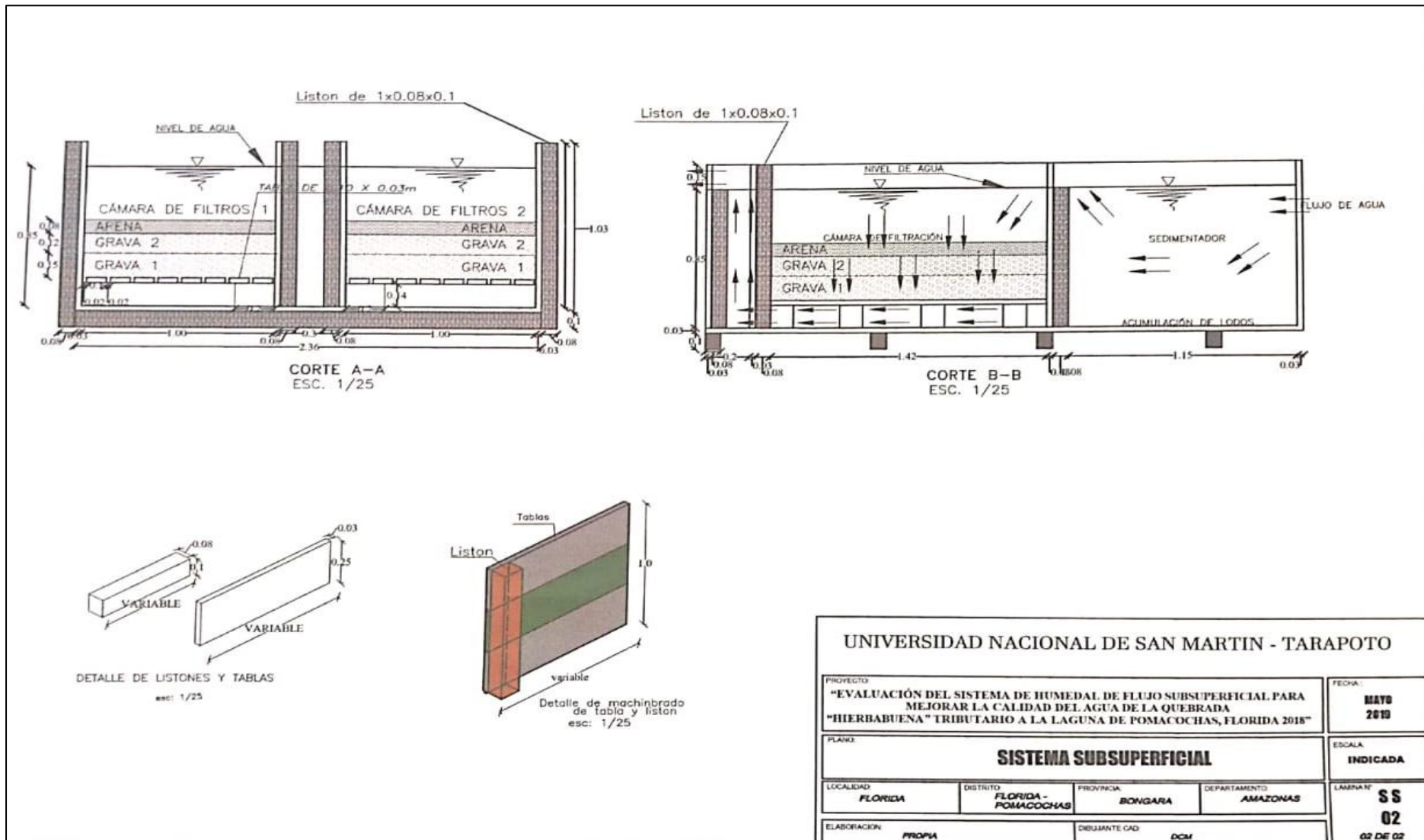
# Anexo A: Mapa de ubicación y localización del desarrollo del proyecto.



## Anexo B: Diseño general del sistema de humedal de flujo subsuperficial



### Anexo C: Cortes y detalles del sistema de humedal de flujo subsuperficial.





**Anexo D: Analisis de los parametrrros físico- químicos (nitratos, fosfatos, oxígeno disuelto, pH y color)**

**RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO N° 1**

**TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN:**

Evaluación del sistema de humedal de flujo subsuperficial, para mejorar la calidad del agua de la quebrada hierbabuena, tributario de la laguna de pomacochas, florida 2018"

**DOCENTE GUÍA Y ORIENTADOR DE LOS ANÁLISIS:**

Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza.  
Especialista Análisis Calidad del Agua

**SOLICITANTE** : Deyson Cubas Mundaca Y Emer Islander Vásquez  
Pósito.  
**PUNTO DE MUESTREO** : Humedal subsuperficial; afluente – efluente.  
**TIPO DE MUESTRA** : Agua Superficial  
**LUGAR** : Quebrada Hierbabuena –Pomacochas  
**LUGAR ANÁLISIS** : Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la FECOL.  
**FECHA DE MUESTREO** : 11/03/2019 hasta 13/05/2019  
**HORA** : 3:30 pm  
**MUESTREADO** : Deyson Cubas Mundaca Y Emer Islander Vásquez  
Pósito.  
**COORDENADAS** : E: 278246.7, N: 9446998.3 2246 MSNM.  
**FECHA DE EMISIÓN** : 03/06/2019  
**SEMANAS DE MUESTREO** : 01 - 10

ITEM	PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS	
			AFLUENTE	EFLUENTE
01	Nitratos	mg/L	05	03
02	Fosfatos	mg/L	11.9	4.8
03	pH	Unidades de pH	5.58	6.68
04	Oxígeno disuelto	mg/L	4.41	4.68
05	DBO <sub>(5)</sub>	mg/L	30	23
06	Color	CPU	54	7

ITEM	PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS	
			AFLUENTE	EFLUENTE
01	Nitratos	mg/L	04	02
02	Fosfatos	mg/L	24.5	8.2
03	pH	Unidades de pH	7.99	7.74
04	Oxígeno disuelto	mg/L	5.1	5.3
05	Color	CPU	35	6

ITEM	PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS	
			AFLUENTE	EFLUENTE
01	Nitratos	mg/L	0.6	0.15
02	Fosfatos	mg/L	12.1	9.05
03	pH	Unidades de pH	7.61	7.44
04	Oxígeno disuelto	mg/L	3.43	5.1
05	Color	CPU	48	5

ITEM	PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS	
			AFLUENTE	EFLUENTE
01	Nitratos	mg/L	0.2	0.0
02	Fosfatos	mg/L	10.6	3.3
03	pH	Unidades de pH	7.88	7.69
04	Oxígeno disuelto	mg/L	4.85	5.48
05	Color	CPU	48	5



ITEM	PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS	
			AFLUENTE	EFLUENTE
01	Nitratos	mg/L	0.8	0.1
02	Fosfatos	mg/L	16.8	10.4
03	pH	Unidades de pH	7.38	7.24
04	Oxígeno disuelto	mg/L	4.41	5.2
05	Color	CPU	42	4

ITEM	PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS	
			AFLUENTE	EFLUENTE
01	Nitratos	mg/L	9.2	0.0
02	Fosfatos	mg/L	15.2	7.4
03	pH	Unidades de pH	7.81	7.71
04	Oxígeno disuelto	mg/L	4.93	4.18
05	Color	CPU	33	6


ITEM	PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS	
			AFLUENTE	EFLUENTE
01	Nitratos	mg/L	7.0	4.1
02	Fosfatos	mg/L	15.0	8.5
03	pH	Unidades de pH	7.64	7.42
04	Oxígeno disuelto	mg/L	4.28	5.88
05	Color	CPU	30	5




ITEM	PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS	
			AFLUENTE	EFLUENTE
01	Nitratos	mg/L	0.04	0.0
02	Fosfatos	mg/L	42.8	7
03	pH	Unidades de pH	7.79	7.59
04	Oxígeno disuelto	mg/L	5.18	6.2
05	Color	CPU	25	4

ITEM	PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS	
			AFLUENTE	EFLUENTE
01	Nitratos	mg/L	4.8	0.2
02	Fosfatos	mg/L	16.1	8.2
03	pH	Unidades de pH	7.89	7.45
04	Oxígeno disuelto	mg/L	5.10	6.32
05	Color	CPU	29	5

ITEM	PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS	
			AFLUENTE	EFLUENTE
01	Nitratos	mg/L	1.7	0.0
02	Fosfatos	mg/L	15.3	10.1
03	pH	Unidades de pH	7.69	7.47
04	Oxígeno disuelto	mg/L	5.3	6.27
05	Color	CPU	29	3

  
 Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza.  
 Especialista Análisis Calidad del Agua

## Anexo E: Registro de recolección de material antropogénico.

	<b>EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA DE LA QUEBRADA HIERBABUENA, TRIBURARIO A LA LAGUNA DE POMACOCCHAS, FLORIDA-2018</b>	<b>SHFSS-V1</b>
		Revisión : 22 de julio de 2018

### Registro de recolección de material antropogénico

Proyecto : *Evaluación del sistema de humedal de flujo subsuperficial, para mejorar la calidad del agua de la quebrada Hierbabuena, tributario de la laguna de Pomacochas*

Fecha de registro : 15/05/2019

Generado en : Sistema de humedal de flujo subsuperficial, Florida - Pomacochas

Generado desde : 11/03/2019 hasta el : 13/05/2019

ITEM	Semanas/ Descripción	semana 1 y 2	semana 3 y 4	semana 5 y 6	semana 7 y 8	semana 9 y 10	Cantidad de Residuos	Unidad	Disposición
01	Plástico	3.40	4.40	1.80	3.60	4.10	12.3	kg	Almacen Temporal del proyecto
02	Metales (Latas)	1.20	2.30	0.60	2.90	2.75	9.75	kg	Almacen Temporal del proyecto
03	Vidrio	2.80	1.20	0.45	2.50	1.65	8.6	kg	Almacen Temporal del proyecto
04	Maderas	6.40	5.40	2.50	4.20	4.90	23.4	kg	Almacen Temporal del proyecto
05	Textiles	1.90	1.10	0.20	2.30	2.60	7.5	kg	Almacen Temporal del proyecto

Total (kg) 66.55

### Entregado por

Nombre: Emperio Islander Vazquez Poirto

Firma: \_\_\_\_\_

### Recibido por


Nombre: Deyson Corbas Hondaca.

Firma: \_\_\_\_\_

**Anexo F: Esatandar de Calidad Ambiental (ECA) para agua, DS N° 004-2017-MINAM, categoria 2, subcategoria 4.**

16

NORMAS LEGALES

Miércoles 7 de junio de 2017 /  El Peruano

Categoría 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino costeras y continentales

Parámetros	Unidad de medida	C1	C2	C3	C4
		Extracción y cultivo de moluscos, equinodermos y tunicados en aguas marino costeras	Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas en aguas marino costeras	Actividades marino portuarias, industriales o de saneamiento en aguas marino costeras	Extracción y cultivo de especies hidrobiológicas en lagos o lagunas
FÍSICOS- QUÍMICOS					
Aceites y Grasas	mg/L	1,0	1,0	2,0	1,0
Cianuro Wad	mg/L	0,004	0,004	**	0,0052
Color (después de filtración simple) (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	100 (a)	100 (a)	**	100 (a)
Materiales Flotantes de Origen Antropogénico		Ausencia de material flotante	Ausencia de material flotante	Ausencia de material flotante	Ausencia de material flotante
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	**	10	10	10
Fósforo Total	mg/L	0,062	0,062	**	0,025
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (c)	mg/L	16	16	**	13
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4	≥ 3	≥ 2,5	≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	7 – 8,5	6,8 – 8,5	6,8 – 8,5	6,0-9,0
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	80	60	70	**
Sulfuros	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	Δ 3	Δ 3



## Anexo G: Panel fotográfico.



*Fotografía 1.* Habilitación de paneles en madera para el sistema.



*Fotografía 2.* Transporte de los paneles de madera para su posterior armado.





**Fotografía 3.** Terminado la instalación de la estructura de tabla.



**Fotografía 4.** Transporte de agregados y grava canto rodado para los filtros.





**Fotografía 5.** Selección de la grava de 1.0-1.5 cm. y 1.5 – 2.0 para los filtros.



**Fotografía 6.** Lavado de la grava para luego agregar al filtro.





*Fotografía 7.* Llenado del material filtrante.



*Fotografía 8.* Llenado de una capa de arena material filtrante.



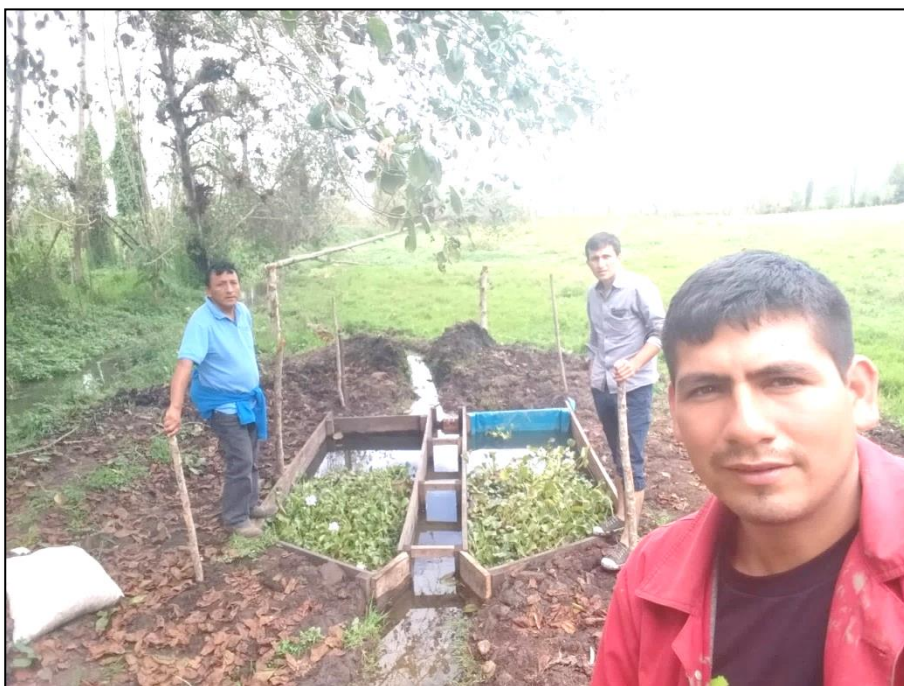


**Fotografía 9.** Fin de la instalación del sistema de flujo subsuperficial.



**Fotografía 10.** Limpieza del cauce de la quebrada hierbabuena.





**Fotografía 11.** Visita técnica del asesor al proyecto.



**Fotografía 12.** Toma de muestra a la salida del filtro, Coordenadas UTM E: 171777.2 N: 9354171.3



**Fotografía 13.** Toma de muestra a la entrada del filtro, coordenadas UTM E: 171746.6 N: 9354140.4



**Fotografía 14:** Frascos rotulados.

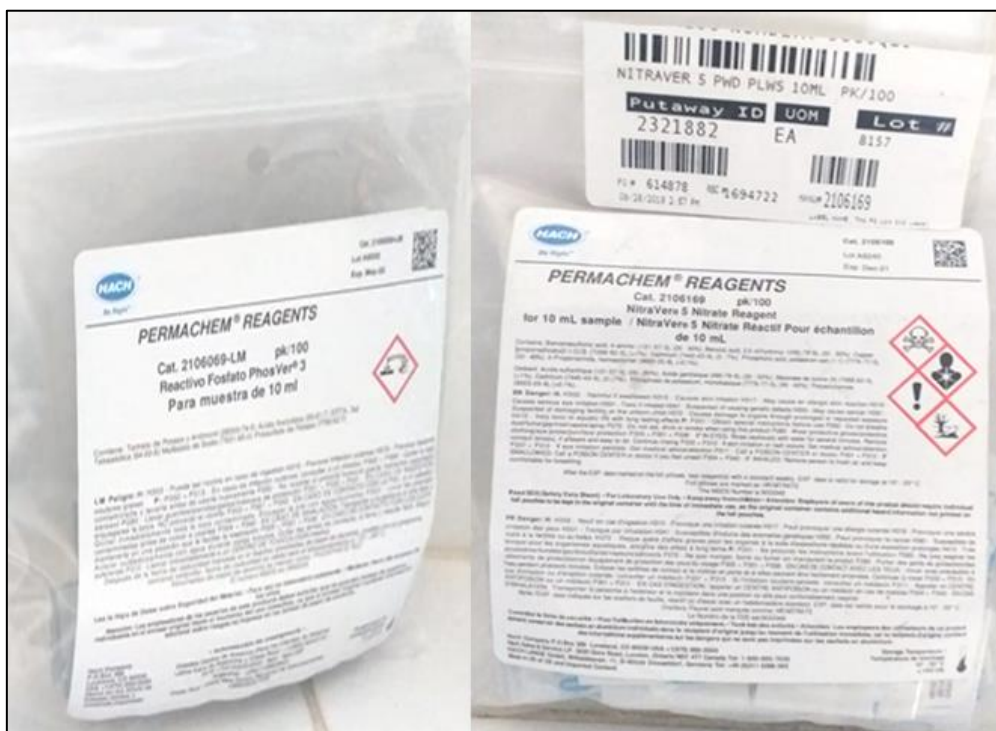




*Fotografía 15:* Análisis de oxígeno disuelto.



*Fotografía 16:* Análisis de pH.



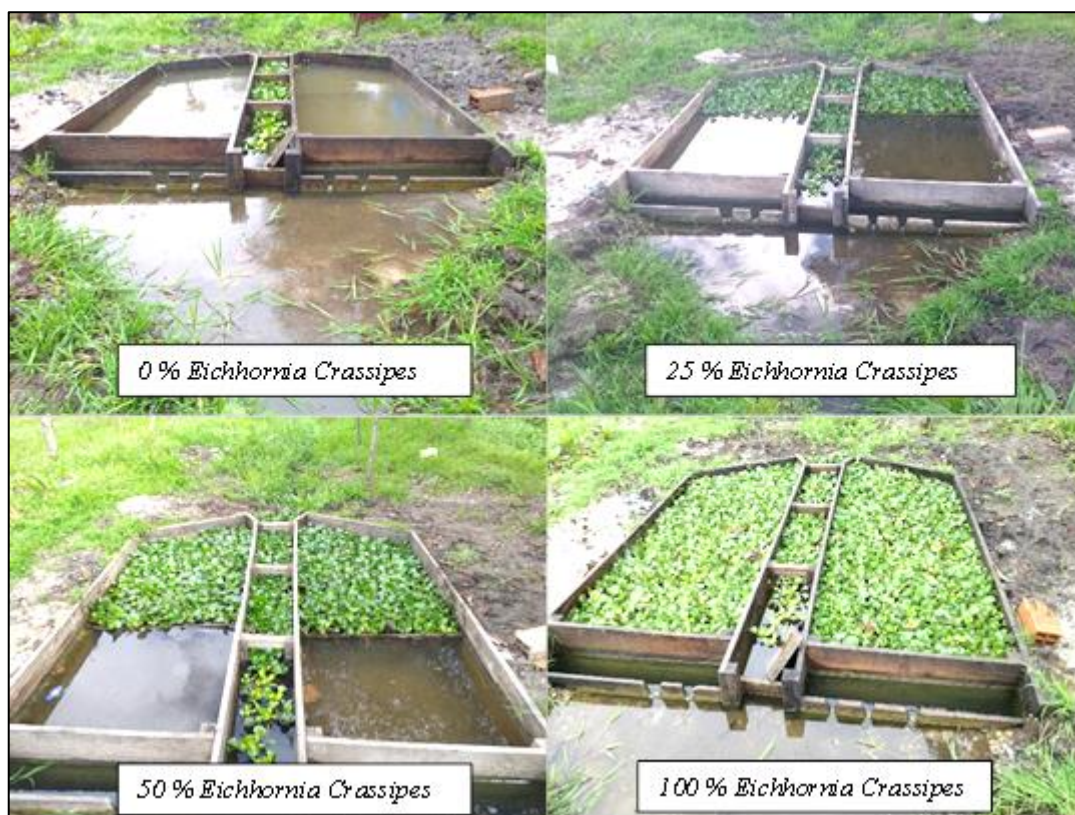
**Fotografía 17.** Reactivos para determinar los nitratos y fósforo total. .



**Fotografía 18.** Equipo DR900 o colorímetro para medir los parámetros de nitrato y Fósforo total.



**Fotografía 19.** Equipo HI 98193 Dissolved Oxygen, para determinar el parámetro Oxígeno disuelto.



**Fotografía 20.** Porcentaje de biomasa de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*)